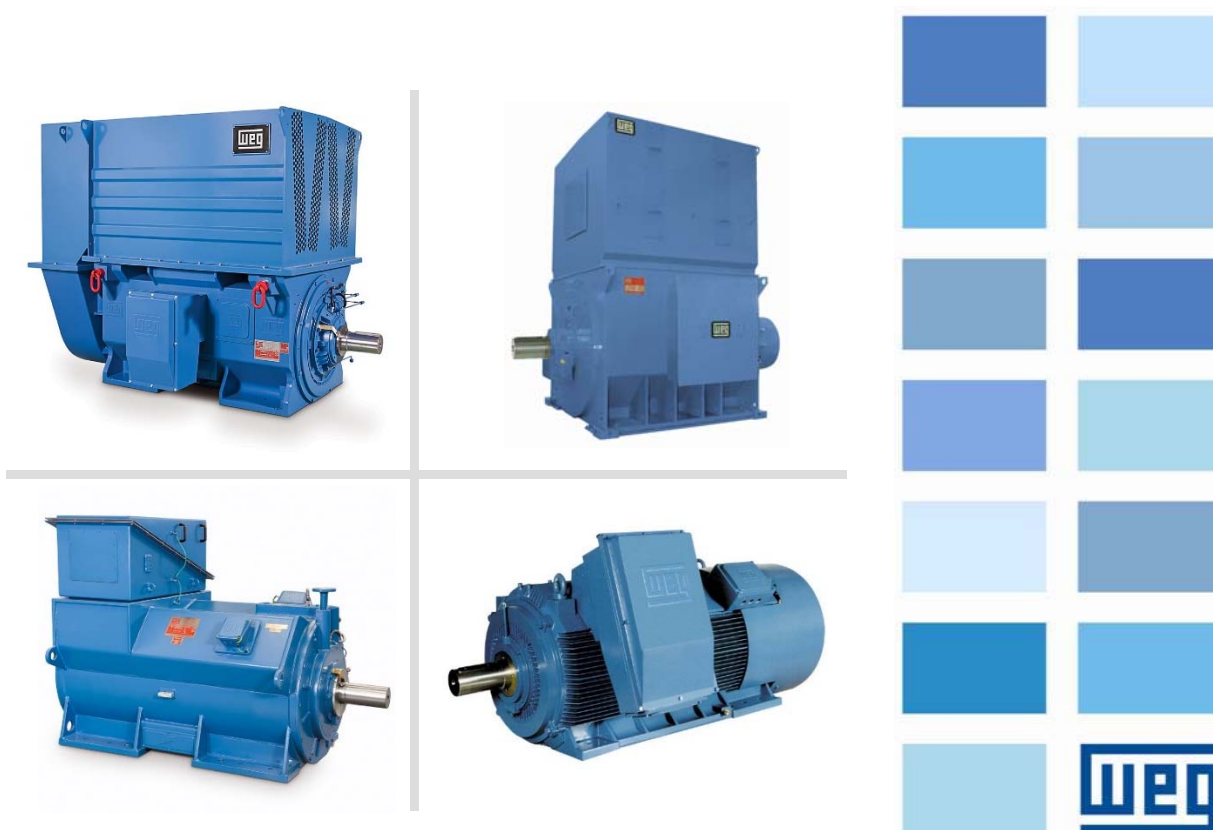
DT-6

Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção

Revisão 3.07/2015

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 17

2 HISTÓRICO DA MÁQUINA ELÉTRICA GIRANTE 17

2.1 EVOLUÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO 18

3 NOÇÕES FUNDAMENTAIS 20

3.1 FUNDAMENTOS DE ELETROMECÂNICA 20

3.1.1 Lei de Faraday e a tensão induzida nos terminais do condutor 20

3.1.2 Lei de Lenz 20

4 MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS 21

4.1 VANTAGENS 21

4.2 CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE 21

4.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO 21

4.3.1 Motor de indução de gaiola 21

4.3.2 Motor de indução de rotor bobinado 22

4.4 VELOCIDADE SÍNCRONA 22

4.5 ESCORREGAMENTO 23

4.6 CIRCUITO EQUIVALENTE 24

4.6.1 Força Eletromotriz e Corrente Induzida 24

4.6.2 Conjugado Eletromagnético 24

4.6.3 Conjugado de Partida 25

4.6.4 Distribuição de potências e perdas 25

4.7 CONJUGADO 26

4.8 ENERGIA E POTÊNCIA MECÂNICA 26

4.9 ENERGIA E POTÊNCIA ELÉTRICA 26

4.10 CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA 27

4.11 POTÊNCIA ELÉTRICA 27

4.12 VELOCIDADE NOMINAL 27

4.13 RELAÇÃO ENTRE CONJUGADO E POTÊNCIA 27

4.14 POTÊNCIA APARENTE, ATIVA E REATIVA 27

4.15 FATOR DE POTÊNCIA 28

4.16 RENDIMENTO 28

4.17 CORRENTE NOMINAL 28

5 CARACTERÍSTICAS DA REDE DE ALIMENTAÇÃO 29

5.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ALTERNADA TRIFÁSICA 29

5.1.1 Ligações no Sistema Trifásico 29

5.2 TENSÃO NOMINAL 30

5.2.1 Tensão da rede de alimentação em função da potência do motor 30

5.3 FREQUÊNCIA NOMINAL 30

5.3.1 Ligação em Frequências Diferentes 30

5.4 TOLERÂNCIA NA VARIAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA 30

6 MOTORES ASSÍNCRONOS DE ALTA TENSÃO WEG 32

6.1 NORMAS APLICÁVEIS 32

6.2 ORIENTAÇÃO PARA SELEÇÃO DE MOTORES 33

6.2.1 Linha Master "M" 33

6.2.2 Linha High Performance "H" 34

6.2.3 Linha “W” Manto d’água 35

6.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS 36

7 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE 37

7.1 ALTITUDE 37

7.2 TEMPERATURA AMBIENTE 37

7.3 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR NAS DIVERSAS COMBINAÇÕES DE TEMPERATURA E ALTITUDE 37

7.4 ATMOSFERA AMBIENTE 37

7.4.1 Ambientes Agressivos 37

7.4.2 Ambientes Contendo Poeiras ou fibras ... 38
7.4.3 Locais em que a Ventilação do Motor é Prejudicada ... 38
7.4.4 Áreas de risco ... 38
7.4.5 Atmosfera Explosiva ... 38
7.4.6 Classificação das áreas de risco ... 38
7.4.7 Classes de temperatura ... 39
7.4.8 Equipamentos para Áreas de Risco ... 40
7.5 GRAUS DE PROTEÇÃO ... 41
7.5.1 Código de Identificação ... 41
7.5.2 Tipos Usuais de Proteção ... 42

8 CARACTERÍSTICAS EM REGIME ... 43
8.1 ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA - CLASSE DE ISOLAMENTO ... 43
8.1.1 Aquecimento no Enrolamento ... 43
8.1.2 Vida Útil do Motor de Indução ... 44
8.1.3 Classes de Isolamento ... 44
8.1.4 Medida da Elevação de Temperatura do Enrolamento ... 46
8.1.5 Aplicação a Motores Elétricos ... 46
8.2 REGIME DE SERVIÇO ... 46
8.2.1 Regimes Padronizados ... 46
8.2.2 Designação do Regime de Serviço ... 49
8.2.3 Potência Nominal ... 49
8.2.4 Potência Equivalente ... 49
8.3 FATOR DE SERVIÇO (FS) ... 50
8.4 VELOCIDADE NOMINAL ... 50
8.5 CORRENTE NOMINAL (A) ... 50
8.6 RENDIMENTO ... 50
8.6.1 Importância do Rendimento ... 51
8.7 FATOR DE POTÊNCIA ... 51
8.7.1 Importância do Fator de Potência ... 51
8.7.2 Correção do Fator de Potência ... 51

9 REFRIGERAÇÃO ... 54
9.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO ... 54
9.1.1 Ventilação Axial ... 54
9.1.2 Ventilação Mista ... 54
9.1.3 Ventilação Bilateral Simétrica ... 56

10 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS ... 58
10.1 CARCAÇAS ... 58
10.2 TROCADOR DE CALOR ... 59
10.3 ESTATOR ... 60
10.4 BOBINAGEM ... 61
10.5 ROTOR ... 63
10.5.1 Rotor de Gaiola ... 63
10.5.2 Rotor Bobinado (ou de Anéis) ... 64
10.6 CAIXA DE LIGAÇÃO ... 66
10.6.1 Caixa de Ligação do Estator ... 66
10.6.2 Caixa de Ligação de Acessórios ... 67
10.6.3 Caixa de Ligação do Rotor, Linha "M" com rotor de anéis ... 67
10.7 EIXO 67
10.8 VENTILADOR ... 68
10.9 PLACA DE IDENTIFICAÇÃO ... 68
10.10 PINTURA ... 68
10.10.1Plano de pintura WEG Máquinas 212E ... 69
10.10.2Plano de pintura WEG Máquinas 212P ... 69
10.11 TERMINAIS DE ATERRAMENTO ... 69
10.12 FORMAS CONSTRUTIVAS NORMALIZADAS ... 70
10.13 MANCAIS ... 70
10.13.1Mancal de Rolamento: ... 70
10.13.2Dimensionamento do mancal e Eixo para Acoplamento por Polias e Correias ... 71
10.13.3Mancal de Bucha ... 71
10.14 LIMITES DE RUÍDOS ... 73
10.15 VIBRAÇÃO ... 74

10.15.1Pontos de Medição 74
10.16 BALANCEAMENTO 74

11 CARACTERÍSTICAS DE PARTIDA....76
11.1 LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PARTIDA 76
11.1.1 Chave Estrela-Triângulo 76
11.1.2 Chave Compensadora (Autotransformador) 76
11.1.3 Partida Estática ou Soft-Starter 77
11.1.4 Partida com Inversor de Frequência 77
11.1.5 Partida com Reostato para Motores de Anéis 80
11.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE PARTIDA 81

12 CARACTERÍSTICAS DE ACELERAÇÃO 82
12.1 POTÊNCIA NOMINAL 82
12.2 CONJUGADO RESISTENTE DA CARGA 82
12.3 INÉRCIA DA CARGA 84
12.4 CONJUGADO MÉDIO DA CARGA 84
12.5 CONJUGADO E ROTAÇÃO DO MOTOR 84
12.6 CATEGORIAS - VALORES MÍNIMOS NORMALIZADOS 85
12.7 TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO (t_{rb}) 86
12.8 CONJUGADO MOTOR MÉDIO (C_{Mmed}) 86
12.9 TEMPO DE ACELERAÇÃO 87
12.10 POTÊNCIA DINÂMICA OU DE ACELERAÇÃO 87
12.11 REGIME DE PARTIDA 89
12.12 CORRENTE DE ROTOR BLOQUEADO 89
12.12.1Valores Máximos Normalizados 89
12.12.2Indicação da Corrente ou Letra Código 89

13 SELEÇÃO E APLICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS ASSÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE ALTA TENSÃO 90

14 PROTEÇÃO E ACESSÓRIOS DE MOTORES ELÉTRICOS 92
14.1 PROTEÇÃO DO ESTATOR 92
14.1.1 Proteção Contra Curtos-Circuitos 92
14.1.2 Proteção Contra Surtos de Tensão - Supressão de Transientes 92
14.1.3 Proteção Diferencial 92
14.2 PROTEÇÃO TÉRMICA PARA MOTORES DE ALTA TENSÃO 92
14.2.1 Termoresistores 92
14.2.2 Termistores (PTC e NTC) 93
14.2.3 Termômetro 93
14.2.4 Termostatos 94

15 ENSAIOS 95
15.1 TIPOS DE ENSAIOS 95
15.1.1 Ensaio de Rotina 95
15.1.2 Ensaio de Tipo 95
15.1.3 Ensaios Especiais 95
15.2 LABORATÓRIO DE ENSAIOS 95
15.2.1 Características dos laboratórios 95
15.3 RELATÓRIOS DE ENSAIO 97
15.3.1 Relatório de Tipo 97
15.3.2 Relatório de Rotina 98
15.3.3 Relatório de Vibração 99
15.3.4 Relatório de Ruído 100

16 MOTORES SÍNCRONOS 101

17 PARTES CONTRUTIVAS DOS MOTORES SÍNCRONOS 101
17.1 ESTATOR 102
17.2 ROTOR 102
17.3 EXCITATRIZ 102

18 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES SÍNCRONOS 103
18.1 CAMPO GIRANTE ... 103
18.2 OPERAÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 104
18.2.1 Velocidade Síncrona ... 104

19 TIPOS DE EXCITAÇÃO ... 105
19.1 EXCITATRIZ ESTÁTICA (COM ESCOVAS) ... 105
19.2 EXCITATRIZ BRUSHLESS (SEM ESCOVAS) ... 105
19.3 EXCITATRIZ BRUSHLESS CA ... 106

20 CONSTRUÇÃO DO ROTOR DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 107
20.1 POLOS LISOS ... 107
20.2 POLOS SALIENTES ... 108
20.2.1 Polos Salientes Laminados ... 108
20.2.2 Polos Salientes Sólidos (Maciços) ... 109

21 MÉTODOS DE PARTIDA ... 111
21.1 TIPOS DE PARTIDA ... 111
21.2 GAIOLA DE PARTIDA ... 112

22 APLICAÇÃO DE CAMPO (PARTIDA) ... 114
22.1 DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO DE CAMPO ... 115
22.1.1 Controle por tensão ... 115
22.1.2 Controle pela frequência ... 116
22.1.3 Excitação para excitatriz CA ... 117

23 CARACTERÍSTICAS DE PARTIDA DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 118
23.1 DEFINIÇÕES ... 118
23.2 TORQUE PULSANTE ... 118

24 VANTAGENS E CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 119
24.1 ALTO RENDIMENTO ... 119
24.2 VELOCIDADE CONSTANTE ... 119
24.3 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA ... 119
24.4 COMPENSADORES SÍNCRONOS ... 120
24.4.1 Como o Compensador Síncrono é utilizado em um sistema elétrico. ... 120
24.5 PAINEL DE EXCITAÇÃO ... 121

25 ORIENTAÇÃO PARA SELEÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 122
25.1 LINHA “S” ... 122
25.2 LINHA “SM40” ... 122

26 CARACTERÍSTICAS CONTRUTIVAS DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 124
26.1 FORMAS CONSTRUTIVAS USUAIS ... 124
26.2 FORMAS CONSTRUTIVAS ESPECIAIS ... 124
26.3 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 125

27 ENSAIOS DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 126
27.1 TIPOS DE ENSAIOS ... 126
27.1.1 Ensaio de Rotina ... 126
27.1.2 Ensaio de Tipo ... 126
27.1.3 Ensaios Especiais ... 126

28 SELEÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS ... 127
28.1 CONJUGADO RESISTENTE E INÉRCIA DA CARGA ... 127
28.2 REGIME DE TRABALHO ... 127
28.3 FATOR DE POTÊNCIA ... 127

28.4 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE 127
28.5 ORIENTAÇÃO PARA SELEÇÃO DE MOTORES SÍNCRONOS E DE INDUÇÃO 127

29 APLICAÇÕES DOS MOTORES SÍNCRONOS 128
29.1 VELOCIDADE FIXA 128
29.2 VELOCIDADE VARIÁVEL 128

30 MANUTENÇÃO 129

31 MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS E GERADORES DE GRANDE PORTE 129
31.1 ASPECTOS ELÉTRICOS 129
31.1.1 Resistência de isolamento 129
31.1.3 Índice de polarização e índice de absorção 130
31.1.4 Medição de resistência ôhmica 130
31.1.5 Surge test 130
31.1.6 Ensaio de tensão aplicada 132
31.1.7 Teste de corrente em vazio 132
31.1.8 Porta-escovas 132
31.2 MANUTENÇÃO MECÂNICA 133
31.2.1 Mancais 133
31.2.2 Mancais de rolamento 133
31.2.3 Nomenclatura 134
31.2.4 Folgas internas 134
31.2.5 Armazenagem 134
31.3 MANUTENÇÃO DOS ROLAMENTOS 135
31.3.1 Cuidados com a troca dos rolamentos 135
31.3.2 Recomendações gerais para desmontagem 135
31.3.3 Ferramentas mecânicas 135
31.3.4 Recomendações gerais para montagem 136
31.3.5 Montagem a frio 136
31.3.6 Montagem a quente 136
31.3.7 Banho de óleo 136
31.3.8 Aquecedor indutivo 137
31.3.10 Desmontagem / montagem dos rolamentos – motores verticais 138
31.3.10.1 Desmontagem do mancal traseiro 138
31.3.10.2 Montagem do mancal traseiro 138
31.3.11 Desmontagem/ Montagem do mancal dianteiro para motores verticais 139
31.3.11.1 Desmontagem 139
31.3.11.2 Montagem 139
31.3.12 Motores lubrificados a óleo 140
31.3.12.1 Desmontagem/ Montagem do mancal lubrificado a óleo 140
31.3.12.2 Desmontagem do mancal: 140
31.3.12.3 Montagem do mancal 140
31.3.13 Relubrificação 140
31.3.15 Lubrificação com graxa 141
31.3.16 Características da lubrificação com graxa 141
31.3.16.1 Vantagens da Graxa 141
31.3.16.2 Desvantagens da Graxa 141
31.3.17 Falhas na Lubrificação: 141
31.3.18 Quantidade de Graxa 141
31.4 RELUBRIFICAÇÃO DE ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS 142
31.4.1 Motores com Graxeira: 142
31.4.2 Graxa padrão da WEG 142
31.4.2.1 Aplicações 142
31.4.2.2 Propriedades 142
31.4.2.3 Características típicas (*) 142
31.4.3 Temperatura de operação e limites 143
31.4.4 Armazenagem de graxas 143
31.4.5 Manuseio, saúde e segurança 143
31.5 DEFEITOS NOS ROLAMENTOS 144
31.5.1 Como se inicia a falha do rolamento 144
31.6 MANCAL DE DESLIZAMENTO 146
31.6.1 Montagem e desmontagem de mancais de deslizamento 146
31.6.2 Desmontagem de mancal (tipo “EF”) 146
31.6.2.1 Lado acionado 147

31.6.2.2 Lado não acionado ... 147
31.6.3 Montagem do mancal ... 147
31.6.4 Estocagem do óleo ... 148
31.7 VIBRAÇÃO ... 148
31.7.1 Análise espectral de vibrações ... 149
31.7.1.1 Equipamentos ... 149
31.7.2 Interpretação dos resultados ... 149
31.7.3 Pontos de medição ... 149

32 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO ... 150
32.1 A CONCEITOS – DEFINIÇÕES SEGUNDO ISO 8402:97 ... 150
32.1.1 Disposição de uma não-conformidade ... 150
32.1.2 Ações Corretivas ... 150
32.1.3 Ações Preventivas ... 150
32.2 PROGRAMAS DE MANUTENÇÃO ... 150
32.2.1 Manutenção preditiva ... 150
32.2.2 Manutenção preventiva ... 150
32.2.3 Manutenção corretiva ... 150
32.2.4 Manutenção de melhoria ... 150
32.4 EXEMPLOS ESTATÍSTICOS DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO E ÍNDICE DE FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS ... 151
32.4.1 Definições – "Curva de vasilha" de um equipamento ... 151
32.5 DIVISÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS – FONTE IEEE ... 151
32.7 PLANO WEG DE MANUTENÇÃO PARA MOTORES ELÉTRICOS ... 152

33 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE ... 153
33.1 INTRODUÇÃO ... 153
33.2 GENERALIDADES ... 153
33.3 LOCAL DE ARMAZENAGEM ... 153
33.4 ARMAZENAGEM INTERNA ... 153
33.5 ARMAZENAGEM EXTERNA ... 153
33.6 PEÇAS SEPARADAS ... 153
33.7 RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO ... 154
33.8 RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO ... 154
33.9 SUPERFÍCIES USINADAS EXPOSTAS ... 154

34 MANCAIS ... 154
34.1 MANCAL DE ROLAMENTO LUBRIFICADO À GRAXA ... 154
34.2 MANCAL DE ROLAMENTO LUBRIFICADO À ÓLEO ... 154
34.3 MANCAL DE DESLIZAMENTO (BUCHA) ... 154
34.4 ESCOVAS ... 154
34.6 CAIXA DE LIGAÇÃO ... 155
34.7 PREPARAÇÃO PARA ENTRADA EM OPERAÇÃO ... 155

35 PLANO DE MANUTENÇÃO DE ARMAZENAGEM ... 156

36 ESCOPOS DE MANUTENÇÃO ... 157
36.1 MANUTENÇÃO PREDITIVA - INSPEÇÃO SENSITIVA ... 157
36.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA ... 157
36.2.1 Peritagem eletromecânica (CAMPO) ... 157
36.2.2 Revisão parcial (campo) ... 157
36.2.3 Revisão geral (campo) ... 158
36.2.4 Rejuvenescimento - motor de indução (fábrica) ... 158
36.2.5 Rejuvenescimento - motor síncrono (fábrica) ... 159
36.3 MANUTENÇÃO CORRETIVA ... 159
36.3.1 Motor de indução ... 159
36.3.2 Motor síncrono ... 159
36.4 DESVANTAGENS DA MANUTENÇÃO CORRETIVA ... 159

37 ANEXOS ... 160
37.1 SISTEMA INTERNACIONAL ... 160

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Velocidades síncronas para os diferentes números de polos 23
Tabela 5.1: Efeito aproximado da variação de tensão sobre as características do motor 31
Tabela 6.1: Correspondência numérica entre normas de motores de indução. 32
Tabela 7.1: Fator de multiplicação da potência útil em função da temperatura ambiente (T) em "°C" e de altitude do nível do mar (H) em "m". 37
Tabela 7.2: Comparativo entre normas ABNT/IEC E NEC/API. 38
Tabela 7.3: Correspondência entre Normas (ABNT/IEC e NEC/API.). 38
Tabela 7.4: Classificação de Áreas Conforme Normas IEC e NEC. 39
Tabela 7.5: Classes de temperatura. 39
Tabela 7.6: Equipamentos para área de risco. (** Não se aplica a motores da Weg Energia) 40
Tabela 7.7: Seleção dos equipamentos segundo ABNT / IEC / VDE. 41
Tabela 7.8: Seleção dos equipamentos segundo NEC. 41
Tabela 7.9: Código de identificação - 1° Algarismo. 41
Tabela 7.10: Código de identificação - 2° Algarismo. 41
Tabela 7.11: Graus de proteção 42
Tabela 8.1: Limites de elevação de temperatura por classe de isolamento. 45
Tabela 8.2: Composição da temperatura em função da classe de isolamento. 46
Tabela 8.3: Correção de Fator de Potência 53
Tabela 10.1: Formas construtivas normalizadas pela NBR5031 70
Tabela 10.2: Nível de potência sonora em dB(A) extraído da IEC60034-9 73
Tabela 10.3: Limites de Vibração (mm/s). 74
Tabela 10.4: Limites de Vibração (μm) 74
Tabela 11.1: Métodos de partida 81
Tabela 12.1: Faixa de rendimentos para alguns tipos de acoplamentos 82
Tabela 12.2: Limites de temperatura com rotor bloqueado 86
Tabela 12.3: Tempo de aceleração para motores de indução 88
Tabela 12.4: Potência aparente com rotor bloqueado (S_P/P_n) para motores trifásicos. 89
Tabela 12.5: Códigos de partida 89
Tabela 13.1: Comparação entre motor de indução com rotor gaiola e de rotor bobinado ou anéis 90
Tabela 14.1: Comparativa entre os detectores de temperatura mais comuns 94
Tabela 18.1: Velocidades síncronas 104
Tabela 31.1: Valores de referência para resistência de isolamento 129
Tabela 31.2: Valores de referência para índices de absorção e polarização 130
Tabela 32.1: Tabela orientativa para manutenções em motores WEG 152
Tabela 37.1: Sistema internacional de unidades 160
Tabela 37.2: Conversão de unidades. 161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Evolução do motor elétrico ... 18
Figura 2.2: Tipos de motores elétricos ... 19
Figura 3.1: Exemplo simplificado da Lei de Faraday ... 20
Figura 4.1: Motor elétrico de indução trifásico ... 21
Figura 4.2: Campo magnético ... 21
Figura 4.3: Rotor de gaiola de esquilo ... 21
Figura 4.4: Motor de indução de rotor bobinado ... 22
Figura 4.5: Circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona com escorregamento s, com secundário (rotor) não referido ao primário (estator). ... 24
Figura 4.6: Distribuição da potência e de perdas em máquinas assíncronas. ... 25
Figura 4.7: Conjugado (exemplo) ... 26
Figura 4.8: Triângulo de potências ... 28
Figura 4.9: Curvas características típicas de motores de indução trifásicos ... 28
Figura 5.1: Sistema trifásico ... 29
Figura 5.2: Ligação triângulo ... 29
Figura 5.3: Ligação estrela ... 29
Figura 5.4: Tensões normalmente utilizadas em função da potência do motor. ... 30
Figura 5.5: Limites das variações de tensão e de frequência em funcionamento. ... 30
Figura 6.1: Motor indução trifásico – Linha H (em corte) ... 36
Figura 6.2: Motor indução trifásico – Linha M (em corte) ... 36
Figura 8.1: Comportamento da temperatura. ... 43
Figura 8.2: Regime contínuo (S1). ... 46
Figura 8.3: Regime S2 ... 47
Figura 8.4: Regime S3. ... 47
Figura 8.5: Regime S4. ... 47
Figura 8.6: Regime S5. ... 47
Figura 8.7: Regime S6. ... 48
Figura 8.8: Regime S7. ... 48
Figura 8.9: Regime S8. ... 48
Figura 8.10: Funcionamento contínuo com solicitações intermitentes. ... 50
Figura 8.11: Funcionamento com carga variável e com repouso entre os tempos de carga ... 50
Figura 8.12: Curvas características típicas de desempenho de motores de indução trifásicos ... 51
Figura 8.13: Triângulo de potências. ... 51
Figura 8.14: Triangulo de potência do Exemplo 1 ... 52
Figura 9.1: Motor totalmente fechado com ventilação externa. ... 54
Figura 9.2: Motor totalmente fechado com ventilação externa independente. ... 54
Figura 9.3: Motor refrigerado por Manto d’água ... 54
Figura 9.4: Motor totalmente fechado com trocador de calor ar-ar ... 54
Figura 9.5: Motor aberto (MGP) ... 54
Figura 9.6: Motor com trocador de calor ar-água. ... 55
Figura 9.7: Motor autoventilado por dutos ... 55
Figura 9.8: Motor com ventilação independente e trocador de calor ar-ar. ... 55
Figura 9.9: Motor aberto com ventilação independente. ... 55
Figura 9.10: Motor com ventilação independente com trocador de calor ar-água. ... 55
Figura 9.11: Motor com ventilação independente por dutos. ... 56
Figura 9.12: Motor totalmente fechado com trocador de calor ar-ar. ... 56
Figura 9.13: Motor aberto. (MAP) ... 56
Figura 9.14: Motor com trocador de calor ar-água. ... 56
Figura 9.15: Motor autoventilado por dutos. ... 56
Figura 9.16: Motor com ventilação independente e trocador ar-ar. ... 57
Figura 9.17: Motor aberto com ventilação independente. ... 57
Figura 9.18: Motor com ventilação independente com trocador ar-água. ... 57
Figura 9.19: Motor com ventilação independente por dutos. ... 57

Figura 10.1: Linha "H", carcaça fundida. 58
Figura 10.2: Linha "M", carcaça soldada. 58
Figura 10.3: Linha "M", carcaça fundida (aberta). 58
Figura 10.4: Linha "M", carcaça fundida (fechada). 58
Figura 10.5: Linha "W" carcaça soldada com espiral 58
Figura 10.6: Motores da linha "M". 59
Figura 10.7: Motor da linha "H". 59
Figura 10.8: Trocador de calor ar-ar (princípio de troca térmica) 59
Figura 10.9: Trocador de calor ar-ar montado em cima do motor. 59
Figura 10.10: Trocador de calor ar-ar montado em volta do estator (MGR ou MAR) 60
Figura 10.11: Trocador de calor ar-água (autoventilado) 60
Figura 10.12: Trocador de calor ar-água (ventilação forçada) 60
Figura 10.13: Pacote de chapas do estator da linha H. 60
Figura 10.14: Pacote de chapas do estator da linha M. 61
Figura 10.15: Isolamentos dos fios de cobre 61
Figura 10.16: Bobina Pré-Formada – Acima de 6KV 61
Figura 10.17: Processo mecanizado de formatação das bobinas. 61
Figura 10.18: Laboratório de bobinagem de alta tensão, fabricação e isolação das bobinas (cabeça de bobina). 62
Figura 10.19: Processo mecanizado de isolação das bobinas (Flat coil). 62
Figura 10.20: Inserção das bobinas nas ranhuras do estator. 62
Figura 10.21: Inserção das bobinas nas ranhuras do estator. 62
Figura 10.22: Ligação das bobinas e amarração das cabeças de bobina. 62
Figura 10.23: Laboratório de impregnação (V.P.I.) de alta tensão. 63
Figura 10.24: Tanque de impregnação a vácuo. 63
Figura 10.25: Estufa (processo de polimerização e cura. 63
Figura 10.26: Rotor de gaiola 63
Figura 10.27: Rotor de alumínio injetado. 63
Figura 10.28: Rotor de barras sem canais radiais de ventilação (linha H). 64
Figura 10.29: Rotor de barras com canais radiais de ventilação (linha M). 64
Figura 10.30: Rotores bobinados ou de anéis. 64
Figura 10.31: Porta-escovas fixo. 65
Figura 10.32: Motor redutor que aciona o sistema de levantamento das escovas. 65
Figura 10.33: Levantamento das escovas 65
Figura 10.34: Coletor e porta-escovas do sistema de levantamento das escovas. 65
Figura 10.35: Porta escovas com dispositivo de levantamento automático/manual. 65
Figura 10.36: Mecanismo de curto-circuito dos anéis coletores. 66
Figura 10.37: Caixa de ligação principal em aço. 66
Figura 10.38: Caixa de ligação principal em aço, com ponto neutro acessível. 66
Figura 10.39: Caixa de ligação principal em aço, com Para-Raios e Capacitores para surtos. 66
Figura 10.40: Caixa de ligação principal com para-raios, capacitor e Transformadores de Corrente. 66
Figura 10.41: Caixa de ligação principal em ferro fundido. 67
Figura 10.42: Caixas de ligação dos acessórios. 67
Figura 10.43: Caixa de ligação do rotor. 67
Figura 10.44: Eixo Maciço. 68
Figura 10.45: Eixo Costelado. Chapas de aço (costelas) são soldadas no eixo principal. 68
Figura 10.46: Ventilador radial. 68
Figura 10.47: Ventilador axial 68
Figura 10.48: Placas de identificação 68
Figura 10.49: Motor com mancal de rolamento a graxa. 71
Figura 10.50: Motor com mancal de rolamento a óleo. 71
Figura 10.51: Rolamentos. 71
Figura 10.52: Motor com mancal de bucha. 72
Figura 10.53: Casquilho e anel pescador. 72
Figura 10.54: Motor com mancal de bucha tipo pedestal 72

Figura 10.55: Mancal de bucha dianteiro 72
Figura 10.56: Mancal de bucha traseiro 73
Figura 10.57: Pontos de medição do Nível de Ruído. 74
Figura 10.58: Pontos de Medição para velocidades de vibração 74
Figura 10.59: Posições recomendadas para medição de vibração relativa no eixo. 74
Figura 10.60: Balanceamento 75
Figura 11.1: Partida estrela-triângulo. 76
Figura 11.2: Fatores de redução K1 e K2 77
Figura 11.3: Partida Direta e com Soft-Starter por rampa de tensão. 77
Figura 11.4: Tensão e corrente no motor. 78
Figura 11.5: Variação linear de tensão e frequência. 79
Figura 11.6: Curva típica de motor aplicado à inversor de frequência. 79
Figura 11.7: Curva Característica V/f com compensação I x R. 80
Figura 11.8: Enfraquecimento de campo para valores de tensão e frequência acima dos nominais. 80
Figura 11.9: Família de curvas de conjugado x velocidade para motores de anéis. 80
Figura 12.1: Conjugado constante 82
Figura 12.2: Conjugado linear. 83
Figura 12.3: Conjugado quadrático 83
Figura 12.4: Conjugado hiperbólico. 83
Figura 12.5: Conjugado não definido 83
Figura 12.6: Momento de inércia em rotações diferentes 84
Figura 12.7: Curva de conjugado nominal e médio de uma carga típica. 84
Figura 12.8: Curva de Conjugado x Rotação 84
Figura 12.9: Curvas Conjugado x Velocidade das diferentes categorias. 85
Figura 12.10: Conjugado motor médio. 86
Figura 12.11: Determinação gráfica do conjugado médio de aceleração. 87
Figura 13.1: Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga. 90
Figura 14.1 - Detector de temperatura em mancal de Bucha. 93
Figura 14.2: Visualização do aspecto externo dos termoresistores. 93
Figura 14.3 - Visualização do aspecto externo dos termistores 93
Figura 14.4 - Termômetro com indicador local. 93
Figura 14.5 - Motor da linha M com vários termômetros. 93
Figura 14.6 - Detector de temperatura na bobinagem do estator. 94
Figura 14.7 - Visualização do aspecto interno e externo do termostato. 94
Figura 15.1: Limite de potência para ensaio a plena carga do laboratório de 5MVA 95
Figura 15.2: Limite de potência para ensaio a plena carga do laboratório de 10MVA 95
Figura 15.3: Limite de potência para ensaio a plena carga do laboratório de 20MVA 96
Figura 15.4 - Laboratório de ensaios 96
Figura 17.1: Motor síncrono trifásico, principais componentes 101
Figura 18.1: Enrolamento monofásico simplificado 103
Figura 18.2: Sistema de tensões trifásico 103
Figura 18.3: Enrolamento trifásico 103
Figura 18.4: Campo magnético resultante 103
Figura 18.5: Defasamento entre os campos 104
Figura 18.6: Campo do Rotor – Polo 104
Figura 19.1: Esquema do sistema de excitação com escovas e anéis coletores 105
Figura 19.2: Anéis coletores 105
Figura 19.3: Porta escovas e anéis coletores 105
Figura 19.4: Esquema de excitação estática 105
Figura 19.5: Esquema de uma excitatriz brushless 106
Figura 19.6: Esquemático em corte de uma máquina síncrona 106
Figura 19.7: Rotor de excitatriz Brushless e seus componentes 106
Figura 19.8: Excitatriz brushless completa (estator e rotor) 106
Figura 19.9: Esquema de conexão de uma excitatriz CC brushless 106
Figura 20.1:Polos Lisos e Polos Salientes – Rotor 107

Figura 20.2:Polos Lisos e Polos Salientes – Rotor e Estator 107
Figura 20.3: Rotor de Polos Lisos 107
Figura 20.4: Eixo direto e eixo quadratura (polos lisos) 108
Figura 20.5: Gráfico Temperatura x Comprimento axial do motor 108
Figura 20.6: Detalhe do "rabo de andorinha" na confecção do polo 108
Figura 20.7: Detalhe da gaiola de partida 109
Figura 20.8: Eixo direto e eixo quadratura (polos salientes) 109
Figura 20.9: Detalhe do bloco do eixo em aço forjado 109
Figura 20.10: Usinagem dos polos do rotor do motor síncrono linha SM40 109
Figura 20.11: Rotor usinado do motor síncrono linha SM40 109
Figura 20.12: Detalhe do rotor de 4 polos 110
Figura 20.13: Rotor completo do motor síncrono linha SM40 110
Figura 21.1: Polos lisos – gaiola simétrica do rotor 112
Figura 21.2: Polos salientes laminados – gaiola do rotor 113
Figura 21.3: Polos salientes sólidos 113
Figura 22.1: Curva de conjugado e corrente x rotação 114
Figura 22.2: Circuito de disparo com controle pela tensão 115
Figura 22.3: Circuito de disparo com controle pela frequência 116
Figura 22.4: Circuito de disparo para excitatriz CA 117
Figura 23.1: Curva de torque pulsante vs tempo 118
Figura 23.2: Curva de torque assíncrono e torque pulsante vs rotação 118
Figura 24.1: Comparativo entre os rendimentos dos motores síncronos com FP=0.8, FP=1.0 e motores de indução 119
Figura 24.2: Correção do fator de potência do sistema com a utilização de motores síncronos 120
Figura 24.3: Compensador síncrono WEG 120
Figura 24.4: Balanço de potência ativa e reativa num sistema simples de duas barras 120
Figura 24.5: Compensador síncrono conectado no sistema elétrico 121
Figura 24.6: Painel de excitação 121
Figura 24.7: Esquemáticos do painel de excitação 121
Figura 25.1: Imagem do motor síncrono SM40 122
Figura 26.1: Forma construtiva IM 1001 (B3) 124
Figura 26.2: Formas construtivas D5 e D6 - Mancais de Pedestais 124
Figura 26.3: Forma construtiva D6 125
Figura 26.4: Forma construtiva D6 125
Figura 26.5: Forma construtiva B3 125
Figura 26.6: Forma construtiva B3 125
Figura 28.1: Orientação para seleção de motor síncrono ou indução 127
Figura 31.1: Ligação dos cabos para ensaio de surge test 130
Figura 31.2: Operação do equipamento de surge test - elevação gradual de tensão 130
Figura 31.3: Formas de onda características do ensaio de Surge Teste 131
Figura 31.4: Rolamento rígido de esfera 133
Figura 31.5: Exemplos de rolamentos: rolamento de rolos cilíndricos, de contato angular e autocompensador de rolos ... 133
Figura 31.6: Exemplos de sacadores de rolamentos: sacador manual e sacador automatizado hidráulico 135
Figura 31.7: Exemplo da correta utilização do sacador de rolamento 135
Figura 31.8: Anel de alumínio para desmontar o anel interno de rolamentos de rolos cilíndricos 135
Figura 31.9: Exemplo de técnica que não deve ser utilizada 136
Figura 31.10: Exemplo de técnicas para manuseio de rolamento: Banho de óleo 136
Figura 31.11: Exemplo de técnica: aquecedor indutivo 137
Figura 31.12: Exemplo de técnica que não deve ser utilizada 137
Figura 31.13: Detalhe do rolamento aplicação em motores verticais 138
Figura 31.14: Desmontagem rolamento de motor vertical 139
Figura 31.15: Técnicas de montagem rolamento 139
Figura 31.16: Detalhes mancal a rolamento lubrificado a óleo 140
Figura 31.17: Defeitos em rolamento - descamamentos 144
Figura 31.18: Efeitos da corrosão por corrente elétrica nos roletes 145

1 INTRODUÇÃO

Este curso tem por objetivo permitir aos profissionais conhecer e saber o que é necessário para especificar um motor de corrente alternada (CA) de indução de alta tensão, compreender o funcionamento, os tipos de acionamentos, os tipos de motores e o dimensionamento destes em função dos tipos de carga. Serão abordadas as características construtivas, instalação, regime de serviço, aplicações, tipos de ensaios, normas e outros.

2 HISTÓRICO DA MÁQUINA ELÉTRICA GIRANTE

O ano de 1866 pode ser considerado, em termos práticos, como o ano de nascimento da máquina elétrica, pois foi nesta data que o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto-induzido. Entretanto, deve-se mencionar que esta máquina elétrica, que revolucionou o mundo em poucos anos, foi o último estágio de um processo de estudos, pesquisas e invenções de muitos outros cientistas, durante quase três séculos.
Em 1600 o cientista inglês William Gilbert publicou, em Londres, a obra intitulada ***"De Magnete",*** descrevendo a força de atração magnética. O fenômeno da eletricidade estática já havia sido observado pelo grego Tales, em 641 A.C., ele verificou que ao atritar uma peça de âmbar com pano esta adquiria a propriedade de atrair corpos leves, como pelos, penas, cinzas, etc.
A primeira máquina eletrostática foi construída em 1663, pelo alemão Otto Guericke, e aperfeiçoada em 1775 pelo suíço Martin Planta.
O físico dinamarquês Hans Christian Oersted, ao fazer experiências com correntes elétricas, verificou ao acaso, em 1820, que a agulha magnética de uma bússola era desviada de sua posição norte-sul quando esta passava perto de um condutor no qual circulava corrente elétrica. Esta observação permitiu a Oersted reconhecer a íntima relação entre magnetismo e eletricidade, dando assim o primeiro passo em direção ao desenvolvimento do motor elétrico.
O sapateiro inglês William Sturgeon - que, paralelamente à sua profissão, estudava eletricidade nas horas de folga - baseando-se na descoberta de Oersted constatou, em 1825, que um núcleo de ferro envolto por um fio condutor elétrico transformava-se em imã quando se aplicava uma corrente elétrica, observando também que a força do imã cessava tão logo a corrente fosse interrompida. Estava inventando o eletroímã, que seria de fundamental importância na construção de máquinas elétricas girantes.
Mas as experiências com o magnetismo e a eletricidade não cessaram. Em 1832, o cientista italiano S. Dal Negro construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém. Já no ano de 1833 o inglês W. Ritchie inventou o comutador, construindo um pequeno motor elétrico onde o núcleo de ferro enrolado girava em torno de um imã permanente. Para dar uma rotação completa, a polaridade do eletroímã era alternada a cada meia volta através do comutador. A inversão da polaridade também foi demonstrada pelo mecânico parisiense H. Pixii ao construir um gerador com um imã em forma de ferradura que girava diante de duas bobinas fixas com um núcleo de ferro. A corrente alternada era transformada em corrente contínua pulsante através de um comutador.
Grande sucesso obteve o motor elétrico desenvolvido pelo arquiteto e professor de física Moritz Hermann Von Jacobi - que, em 1838, aplicou-o a uma lancha.
Somente em 1866 Siemens construiu um gerador sem a utilização de imã permanente, provando que a tensão necessária para o magnetismo podia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, isto é, que a máquina podia auto-excitar-se. O primeiro dínamo de Werner Siemens possuía uma potência de aproximadamente 30 watts e uma rotação de 1200rpm. A máquina de Siemens não funcionava somente como gerador de eletricidade. Podia também operar como motor, desde que se aplicasse aos seus bornes uma corrente contínua.
Em 1879, a firma Siemens & Halske apresentou, na feira industrial de Berlim, a primeira locomotiva elétrica, com uma potência de 2kW.
A nova máquina de corrente contínua apresentava vantagens em relação à máquina a vapor, à roda d'água e à força animal. Entretanto, o alto custo de fabricação e sua vulnerabilidade em serviço (por causa do comutador) marcaram-na de tal modo que muitos cientistas dirigiram suas atenções para o desenvolvimento de um motor elétrico mais barato, mais robusto e de menor custo de manutenção.
Entre os pesquisadores preocupados com esta ideia destacam-se o iugoslavo Nicola Tesla, o italiano Galileu Ferraris e o russo Michael von Dolivo Dobrowolsky. Os esforços não se restringiram somente ao aperfeiçoamento do motor de corrente contínua, mas também se cogitou de sistemas de corrente alternada, cujas vantagens já eram conhecidas desde 1881.
Em 1885, o engenheiro eletricista Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Ferraris, apesar de ter inventado o motor de campo girante, concluiu erroneamente que motores construídos segundo este princípio poderiam, no máximo, obter um rendimento de 50% em relação à potência consumida. E Tesla apresentou, em 1887, um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto-circuito. Também este motor apresentou rendimento insatisfatório, mas impressionou de tal modo a firma norte-americana Westinghouse, que esta lhe pagou um milhão de dólares pelo privilégio da patente, além de se comprometer ao pagamento de um dólar para cada HP que viesse a produzir no futuro. O baixo rendimento deste motor inviabilizou economicamente sua produção e três anos mais tarde as pesquisas foram abandonadas.
Foi o engenheiro eletricista Dobrowolsky, da firma AEG, de Berlim, que, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada entrou, em 1889, com o pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola. O motor apresentado tinha uma potência de 80 watts, um rendimento aproximado de 80% em relação à potência consumida e um excelente conjugado de partida. As vantagens do motor com rotor de gaiola em relação ao de corrente contínua eram marcantes: construção mais simples, silencioso, menor manutenção e alta segurança em operação. Dobrowolsky desenvolveu, em 1891, a primeira fabricação em série de motores assíncronos, nas potências de 0,4 a 7,5kW.

2.1 EVOLUÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO

O desenvolvimento de condutores esmaltados, dos papéis ou filmes isolantes sintéticos, das chapas magnéticas, das ligas de alumínio e dos materiais plásticos contribuíram notoriamente para a redução da relação peso x potência dos motores elétricos como mostra a Figura 2.1.
Observando-se o peso de um motor de mesma potência no decorrer do tempo, podemos verificar que o motor atual tem apenas 8% do peso do seu antecessor em 1891. Confrontando-se os dados de catálogos de diferentes fabricantes, em diferentes épocas, pode-se constatar que houve uma redução de peso e, consequentemente, redução do tamanho construtivo do motor (para uma mesma potência) de aproximadamente 20% a cada década, excetuando as duas últimas, nas quais a redução foi menos acentuada. Isto mostra a necessidade de revisão periódica das normas, para assim adaptar a relação entre potências e carcaças aos tamanhos alcançados através do desenvolvimento tecnológico.
Esta evolução tecnológica é caracterizada principalmente, pelo desenvolvimento de novos materiais isolantes, os quais suportam temperaturas mais elevadas.
Atualmente os motores elétricos estão presentes em praticamente todas as instalações industriais, comerciais e residenciais.
Exemplos são os minúsculos motores que acionam os discos rígidos dos computadores, a infinidade de motores que acionam nossos eletrodomésticos e os gigantes motores que movimentam bombas, compressores, ventiladores, moinhos, extrusoras e outras infinidades de aplicações.

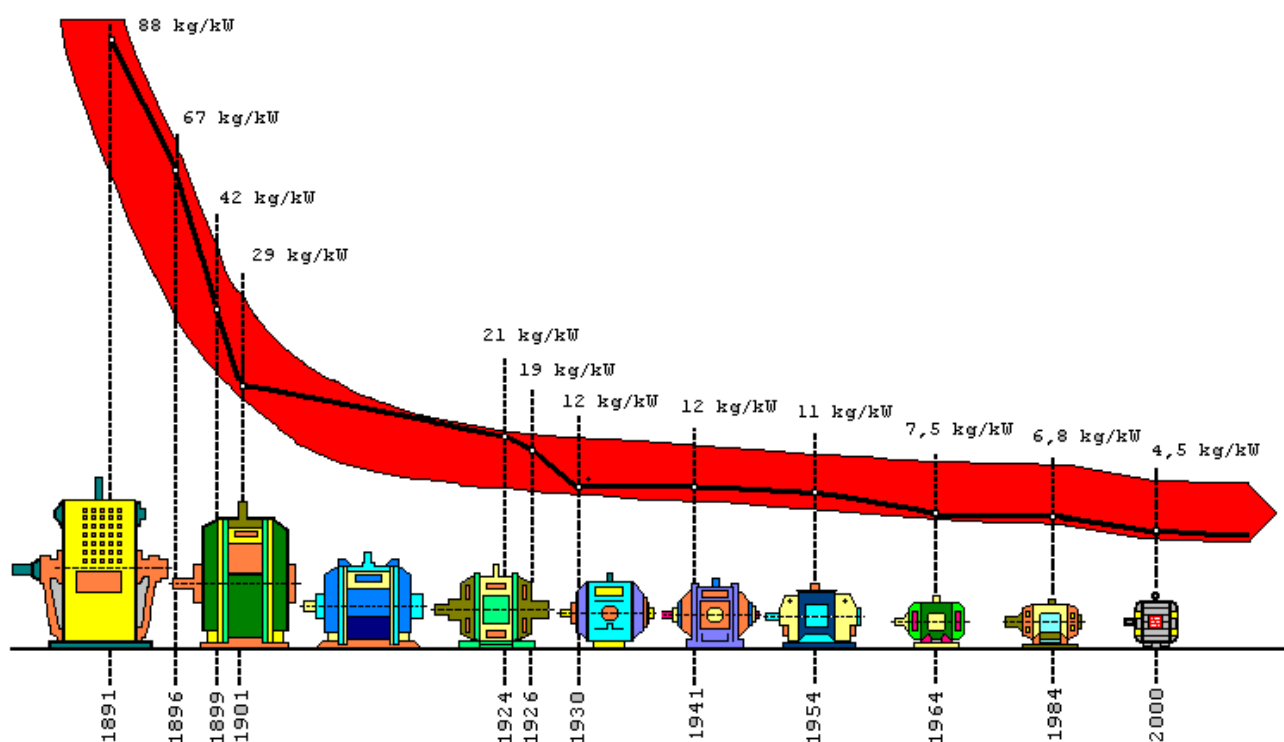



Figura 2.1: Evolução do motor elétrico

Todos têm algo em comum, precisam de energia elétrica para produzir trabalho. Se por um lado é inevitável o consumo de energia elétrica para a utilização dos motores, por outro lado, a escolha adequada dos mesmos e alguns cuidados especiais no seu uso podem economizar muita energia.
Atualmente, a indústria, necessitando de motores para acionamento das mais variadas cargas e exige dos fabricantes a adequação a esta realidade, obtendo-se desta forma uma gama elevada de equipamentos desta natureza, como mostra a Figura 2.2.
No campo de acionamentos industriais, que é o objeto deste curso, estima-se que de 70 a 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica através dos motores elétricos.
Isto significa que, admitindo-se um rendimento médio da ordem de 80% do universo de motores em aplicações industriais, cerca de 15% da energia elétrica industrial transforma-se em perdas nos motores.
O processo de especificação de um motor elétrico corresponde à escolha de um motor industrialmente disponível que possa atender a pelo menos três requisitos do consumidor:

- Característica da rede de alimentação: (tipo, tensão, frequência, simetria, equilíbrio, etc.);
- Características do ambiente: (altitude, temperatura, agressividade, etc.);
- Características da carga acionada (potência, rotação, esforços mecânicos, configuração física, conjugados requeridos, etc.).

O processo não envolve somente a coleta de informações para a definição das características construtivas e de desempenho do motor, mas também visa otimizar a escolha sob a ótica da economia e da confiabilidade.
A dificuldade está em que cada um dos requisitos anteriores são do conhecimento específico de profissionais de diferentes áreas, por exemplo:

- Engenharia de Instalações...Características da rede de Alimentação;
- Engenharia de Manutenção...Características do Ambiente;
- Engenharia de Processos...Características construtivas de cada motor.

O espaço a ser preenchido entre o fabricante e o consumidor é a perfeita interligação entre estas áreas de modo que determinada aplicação seja coroada de êxito.
Esta nova área é denominada de ***Engenharia de Aplicações***.

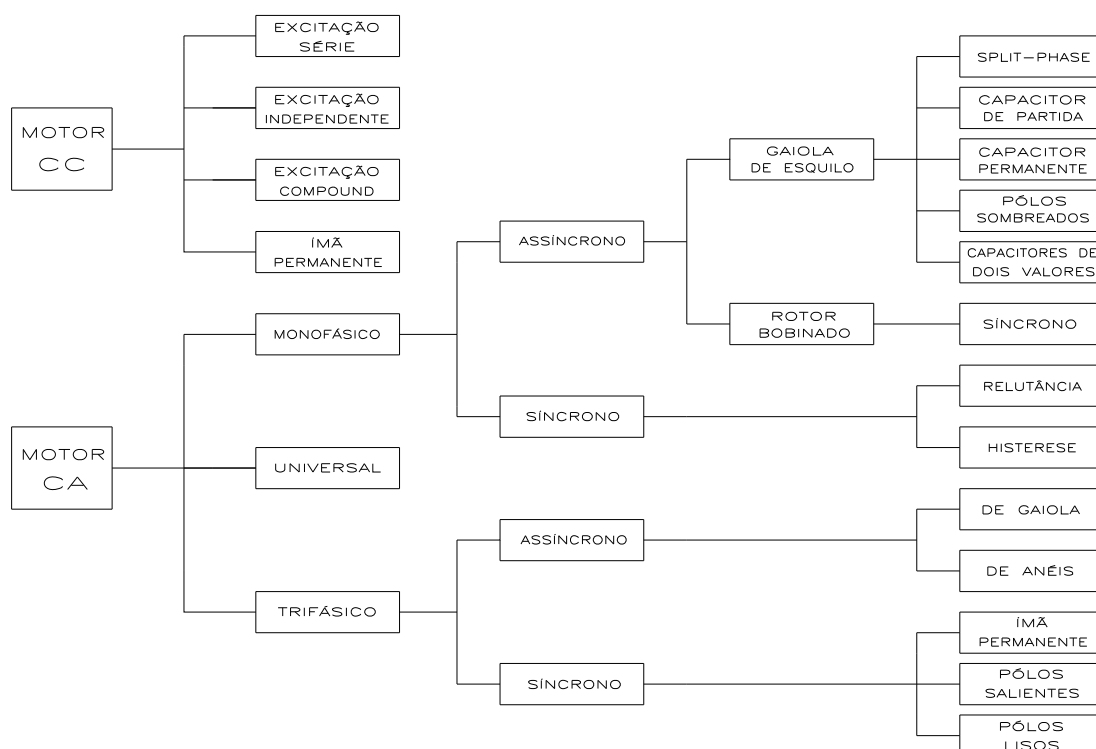



Figura 2.2: Tipos de motores elétricos

3 NOÇÕES FUNDAMENTAIS

3.1 FUNDAMENTOS DE ELETROMECÂNICA

O processo da conversão eletromagnética de energia apresentada em 1831 por Michael Faraday deu início a estudos concentrados em uma nova forma de geração e utilização da energia elétrica, até então apenas obtida através de processos químicos (princípio da pilha e bateria).
Como resultado destes estudos, o desenvolvimento da teoria da conversão eletromecânica de energia, na qual energia mecânica pode ser convertida em energia elétrica e vice-versa através das máquinas elétricas.
Deste modo, da geração até a utilização, a conversão de energia (elétrica e mecânica) pode ocorrer diversas vezes.
Deste modo, para entender os princípios básicos de funcionamento de uma máquina elétrica, seja ela um motor ou um gerador, a compreensão de alguns fenômenos básicos da conversão eletromagnética de energia se faz necessário.

3.1.1 Lei de Faraday e a tensão induzida nos terminais do condutor

Com base em experimentos utilizando dispositivos semelhantes à representação abaixo, Faraday pode concluir que:
“A tensão induzida nas extremidades de um condutor imerso em um campo magnético conforme apresentado na Figura 3.1 é proporcional à razão entre o fluxo (linhas de força que cortam o condutor) e o tempo em que as linhas de força cortam este condutor.”

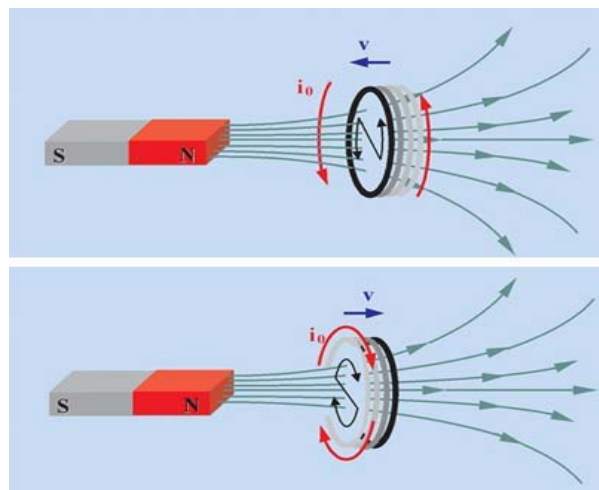



Figura 3.1: Exemplo simplificado da Lei de Faraday

De modo geral podemos simplificar o acima exposto na seguinte relação:

$$V_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Onde: V_i = Tensão induzida nos terminais do condutor.
$\Delta\Phi$ = Variação do fluxo magnético, linhas de força magnéticas que cortam o condutor.
Δt = Variação de tempo em segundos em que tais linhas de força cortam o condutor.

Com base na conclusão de Faraday e na relação descrita pode-se entender que a variação da tensão pode ser obtida de duas formas: variação do fluxo magnético (aumento/diminuição das linhas de fluxo que cortam o condutor) ou com a variação na frequência.
Devemos, porém considerar que a análise acima se baseia em um caso ideal, em que o condutor está totalmente perpendicular com o campo magnético. Em máquinas elétricas comerciais este condutor pode não estar totalmente perpendicular com o campo magnético bem como seu movimento pode não ser perpendicular a ele. Estas variantes devem ser consideradas uma vez que afetam diretamente no valor da tensão induzida nos terminais do condutor.
A análise acima será bastante útil e deverá ser retomada adiante quando será explicado o princípio básico de funcionamento de uma máquina elétrica, seja ela operando como um motor ou gerador.

3.1.2 Lei de Lenz

Em complemento ao que demonstrou Faraday veio a lei de Lenz, fundamentada pelo físico Heinrich E. Lenz. Ele observou que a corrente elétrica induzida produzia efeitos opostos a suas causas. Mais especificamente, Lenz estabeleceu que o sentido da corrente elétrica induzida é tal que o campo magnético criado por ela opõe-se à variação do campo magnético que a produziu. Esta formulação da lei de Lenz implica em uma causa e um efeito opondo-se a causa. A causa envolvida é a variação do fluxo que corta o condutor. O efeito envolvido é uma corrente (devido à tensão induzida) cujo campo se opõe à causa. Assim, em todos os casos de indução eletromagnética, sempre quando ocorre uma variação no fluxo concatenado, uma tensão é induzida, a qual tende a estabelecer uma corrente numa direção tal que produza um campo em oposição à variação do fluxo que concatena as espiras do circuito.

4 MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

À primeira vista, as máquinas de indução podem ser também consideradas como máquinas de excitação única, porque são aplicadas a seu estator apenas tensões alternadas polifásicas. Será visto, contudo, que uma tensão alternada de frequência variável é induzida no seu rotor, da mesma maneira que se induz uma tensão alternada, por ação transformadora, num secundário de um transformador. A máquina de indução, consequentemente, é uma máquina de dupla excitação, na qual uma tensão alternada CA é aplicada a ambos os enrolamentos, ao do estator (armadura) e ao do rotor. A tensão aplicada ao enrolamento da armadura é uma tensão de excitação de frequência (normalmente) constante e de potencial também (normalmente) constante, suprida por um barramento polifásico ou monofásico, da mesma maneira que as máquinas síncronas. A tensão aplicada ao rotor é uma tensão induzida, de frequência e potencial variáveis, produzida como consequência da velocidade do rotor em relação à velocidade síncrona.

4.1 VANTAGENS

- Limpeza e simplicidade de comando;
- Construção simples e custo reduzido;
- Grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos.

O motor de indução trifásico opera normalmente com uma velocidade constante que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo, devido a sua SIMPLICIDADE e ROBUSTEZ é um motor muito utilizado, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática.
A vantagem do motor de indução com rotor de gaiola em comparação ao de rotor bobinado é que resulta numa construção do induzido mais rápida, mais prática e mais barata.
Trata-se de um motor robusto, barato, de rápida produção, não exigindo coletor, reduzindo portanto a quantidade de componentes no motor e consequentemente simplificando sua manutenção, além de se ser uma máquina de rápida ligação à rede.

Figura 4.1: Motor elétrico de indução trifásico

4.2 CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

Este princípio do eletromagnetismo clássico é extremamente interessante e sua descoberta possibilitou o desenvolvimento dos modernos motores de corrente alternada, em particular os motores de indução. De modo sintético, seu enunciado é: ***"Três correntes alternadas senoidais, com mesma amplitude e defasadas de 120º, circulando por três bobinas fixas, cujos eixos magnéticos distam 120º entre si, produzem um campo magnético girante de intensidade constante."*** A invenção desta engenhosa maneira de criar este campo se deve a um brilhante engenheiro croata, Nikola Tesla (1856-1943). A Figura 4.2 mostra como é o funcionamento do campo girante.

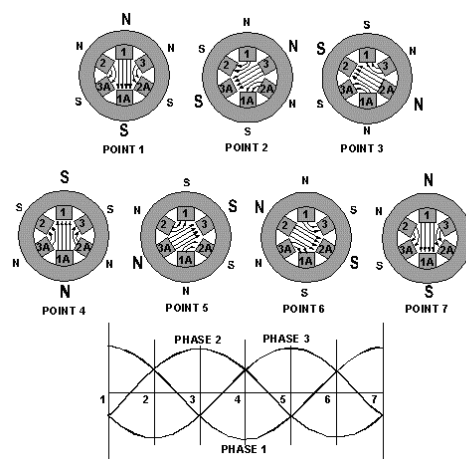



Figura 4.2: Campo magnético

Na Figura 4.2 observamos também a orientação do "***campo resultante***" e as funções de onda das tensões alternadas, todas defasadas de 120º. Vemos em dois instantes diferentes como a orientação resultante do campo muda e desta forma se percebe o movimento do mesmo.

4.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

Uma questão fundamental é entender como se produz um torque eletromecânico no rotor do motor de indução. A criação do torque no rotor baseia-se na lei de indução de Faraday e na lei de Lenz.

4.3.1 Motor de indução de gaiola

Inicialmente é importante entender como é a construção dos principais componentes que participam dos conceitos básicos de operação do motor de indução. Segue abaixo desenho ilustrativo de um rotor gaiola de esquilos.

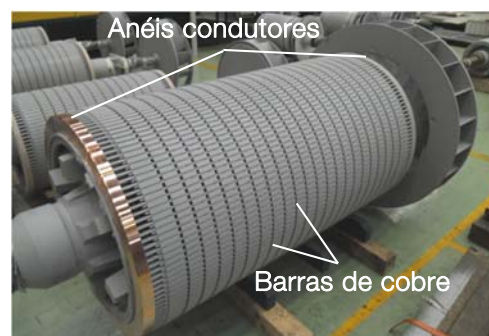



Figura 4.3: Rotor de gaiola de esquilo

Note que a gaiola possui anéis metálicos na tampa e na base, de tal modo a curto-circuitar as barras e permitir a circulação de correntes por elas.
O rotor em gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são inseridas barras de cobre, dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, que curto-circuitam as barras. As barras da gaiola de esquilo podem ainda ser fabricadas de alumínio injetado ou liga de latão. As barras do rotor tipo gaiola de esquilo nem sempre são paralelas ao eixo do rotor. As mesmas podem ser deslocadas ou colocadas segundo um pequeno ângulo em relação a ele, para produzir um torque mais uniforme e para reduzir o ruído magnético durante a operação do motor.
O estator do motor é também constituído por um núcleo ferromagnético laminado, nas cavas do qual são colocados os enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica.
Voltando aos princípios de Faraday, quando temos uma variação do fluxo magnético com o tempo em uma bobina, surge uma tensão na mesma, e consequentemente surge uma corrente circulando por ela. Esta corrente tem o sentido de circulação definido pela Lei de Lenz (enunciada aqui de forma simplificada: ***"O fluxo criado pela corrente induzida deve se opor à variação de fluxo que a criou"***). Deste modo surge polaridade na bobina opostas as do fluxo.
Em um motor de indução esse fluxo variável é feito pelo campo girante descrito acima. Esse fluxo atravessa o rotor tipo gaiola também apresentado anteriormente. Esse fluxo girante ao ir atravessando as barras do rotor gaiola vai induzindo aí correntes que, por sua vez, devem criar fluxos (como se fossem eletroímãs de polaridade oposta ao fluxo) que tendem a se opor ao movimento do fluxo girante (Lei de Lenz).
Em consequência, o rotor gaiola gira no mesmo sentido do fluxo girante, tentando alcançá-lo para reduzir a intensidade da indução, que como se sabe é proporcional à variação do fluxo (lei de Faraday). Desta maneira, estabelece-se o torque (conjugado) que faz o rotor gaiola girar. Este conjugado pode ser equacionado da seguinte forma:

$$C = \frac{P_s}{\omega_s}$$

Onde: C = conjugado nominal (Nm);
P_s = potência saída nominal (kW);
ω_s = velocidade angular (radianos por segundo).

Por sua vez a **"potência de saída"** do motor depende das perdas totais no motor, que podem ser separadas nas seguintes perdas, segundo a norma IEC 60034-2:
- Perdas totais no cobre do estator;
- Perdas totais no cobre do rotor;
- Perdas por atrito e ventilação;
- Perdas no ferro;
- Perdas suplementares (são todas as perdas que não podem ser mensuradas).

4.3.2 Motor de indução de rotor bobinado

O motor de indução de rotor bobinado difere do motor de rotor em gaiola de esquilo apenas quanto ao rotor. O rotor é constituído por um núcleo ferromagnético laminado sobre o qual são alojadas as espiras que constituem o enrolamento trifásico, geralmente em estrela. Os três terminais livres de cada uma das bobinas do enrolamento trifásico são ligados a três anéis coletores. Estes três anéis ligam-se externamente a um reostato de partida, constituído por resistências variáveis, ligadas também em estrela. Deste modo os enrolamentos do rotor também ficam em circuito fechado.

Figura 4.4: Motor de indução de rotor bobinado

A função do reostato de partida, ligado aos enrolamentos do rotor, é a de reduzir as correntes de partida elevadas e ao mesmo tempo elevar o torque, possibilitando a partida de cargas pesadas, no caso de motores de elevada potência.
À medida que o motor acelera, a resistência do reostato vai sendo progressivamente reduzida, até que na velocidade nominal do motor seja curto-circuitada (retirada), quando o motor passa a funcionar no seu regime nominal. Ao entrar no regime nominal, o motor de rotor bobinado também funciona com os elementos do rotor em curto-circuito (tal como o motor de rotor em gaiola de esquilo).
O motor de indução de rotor bobinado substitui o de rotor em gaiola de esquilo em potências muito elevadas pois possibilita partir cargas com torque linear e/ou elevado momento de inércia, através do abaixamento da corrente de arranque permitida pela configuração do rotor, somado ao aumento do torque de partida.
Apesar de ser utilizados em casos com velocidades constantes de serviço, como referimos no último parágrafo, aplica-se também em velocidades variáveis.

4.4 VELOCIDADE SÍNCRONA

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos (2p) do motor e da frequência (f) da rede, em hertz.
Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um "***norte***" e um "***sul***") ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de polos (p) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem polos ou p pares de polos, a velocidade do campo será:

$$n_S = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad \text{(rpm)}$$

Exemplo:
Qual a rotação síncrona de um motor de 6 polos, 50Hz?

$$n_S = \frac{120 \,.\, f}{2p} = \frac{120 \,.\, 50}{6} = 1000 \, rpm$$

Note que o número de polos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de polos. Para as frequências e “***polaridades***” usuais, as velocidades síncronas são:

Tabela 4.1: Velocidades síncronas para os diferentes números de polos

Nº de polos	Rotação síncrona por minuto	
	60 Hz	50Hz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750

Para motores de “***dois polos***”, o campo percorre uma volta a cada ciclo. Assim, os graus elétricos equivalem aos graus mecânicos. Para motores com mais de dois polos, tem-se, de acordo com o número de polos, um giro “***geométrico***” menor, sendo inversamente proporcional a 360° em dois polos.
Por exemplo: Para um motor de seis polos tem-se, em um ciclo completo, um giro do campo de

$\frac{360^o \,.\, 2}{6} = 120^o$ geométricos. Isto equivale, logicamente, a 1/3 da velocidade em dois polos. Conclui-se, assim, que:

Graus geométricos = Graus mecânicos x *p*

4.5 ESCORREGAMENTO

Em um motor elétrico assíncrono, o rotor sempre irá girar com rotação abaixo da rotação do campo girante e, portanto, haverá corrente e torque (conjugado eletromecânico) induzidos. A diferença relativa entre as velocidades do rotor e do campo girante do estator (na velocidade síncrona) é conhecida como “***escorregamento***” e é representada por:

$$s_{\%} = \frac{n_S - n}{n_S} .100$$

Onde: n_S = Velocidade síncrona (rpm);
n = Velocidade rotórica (rpm);
s = Escorregamento.

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona (rotação do campo girante), o enrolamento do rotor corta as linhas de força magnéticas do campo girante e, pelas leis do eletromagnetismo, circularão nele correntes induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter um maior conjugado, proporcionalmente terá que ser maior a diferença de velocidades entre rotor e o campo girante no estator para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta, cai a rotação do motor. Quando a carga for zero (motor a vazio) o rotor irá girar praticamente na rotação síncrona.
A frequência da corrente induzida no rotor é igual ao escorregamento vezes a frequência do estator. Ou seja:

$$f_2 = s \,.\, f_1$$

Onde: f_1 = Frequência da corrente estatórica (Hz);
f_2 = Frequência da corrente rotórica (Hz).

A vazio o escorregamento é muito pequeno, portanto, como no rotor, sua reatância e sua f.e.m. induzida são todas muito pequenas. Assim, a corrente do rotor é reduzida, apenas suficiente para produzir o torque necessário a vazio. O fator de potência é extremamente baixo e em atraso, com cos $\varphi < 0{,}3$, pois a corrente que circula pelo motor é praticamente utilizada apenas para a sua magnetização.
Quando uma carga mecânica é aplicada ao rotor, a velocidade decresce um pouco. O pequeno decréscimo na velocidade causa um aumento no escorregamento, na frequência da corrente rotórica, na sua reatância e na sua força eletromotriz induzida. O aumento da corrente induzida no rotor reflete-se num aumento da corrente primária do estator (componente esta que produz potência). Uma corrente maior será produzida no estator, com um melhor fator de potência, tendendo a produzir mais potência mecânica e solicitar mais potência da linha. À plena carga o motor de indução irá girar a um escorregamento que promove o equilíbrio entre o torque desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga.
O fator de potência a plena carga varia de 0,8 (em pequenos motores de aproximadamente 1 cv) a aproximadamente 0,95 (nos grandes motores, acima de 150 cv). Em primeira análise pode parecer que aumentos além da plena carga produzirão melhoria no fator de potência, e aumento na corrente de fase do estator. Porém, com o aumento da carga e do escorregamento, a frequência da corrente rotórica continua a aumentar e o aumento na reatância do rotor produz uma diminuição no fator de potência do mesmo. Portanto, com cargas acima da plena carga, o fator de potência aproxima-se de um máximo e então decresce rapidamente.

4.6 CIRCUITO EQUIVALENTE

Nas situações em que o escorregamento é diferente de 0 e 1, haverá f.e.m. induzida no secundário e, consequentemente haverá conversão eletromecânica com potência em jogo, onde tem-se então um circuito equivalente com os parâmetros e variáveis para o primário e para o secundário:

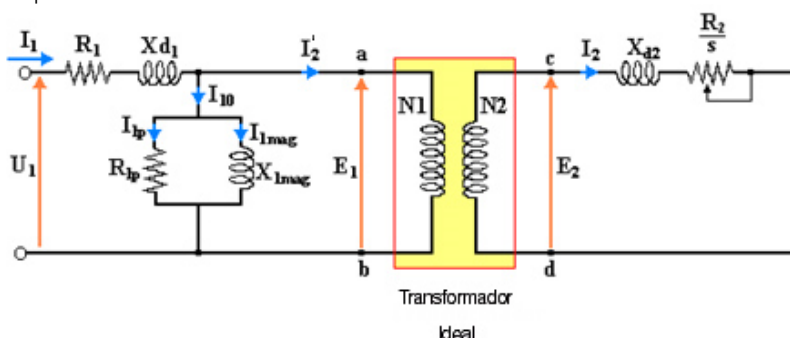



Figura 4.5: Circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona com escorregamento s, com secundário (rotor) não referido ao primário (estator).

Onde:
- R_1 = Resistência estatórica;
- U_1 = Tensão estatórica;
- X_{d1} = Reatância estatórica;
- I_1 = Corrente estatórica;
- R_2 = Resistência rotórica;
- I_{1p} = Corrente de perdas no ferro;
- X_{d2} = Reatância rotórica;
- I_{1mag} = Corrente de magnetização;
- X_{1mag} = Reatância de magnetização;
- I_2 = Corrente rotórica;
- R_{1p} = Resistência de perdas no ferro;
- E_1 = f.c.e.m. estatórica;
- E_2 = f.e.m. rotórica.

4.6.1 Força Eletromotriz e Corrente Induzida

Considere a máquina com um escorregamento não nulo. Haverá indução de f.e.m. no rotor e ela pode ser definida em função do escorregamento. Com o rotor parado, o campo rotativo estatórico gira com a mesma velocidade relativamente aos enrolamentos do rotor e estator, induzindo no rotor, f.e.m. proporcionais à frequência f_1 (frequência da corrente estatórica).
Pela teoria, para motor com rotor bloqueado, tem-se que as tensões induzidas no rotor (f.e.m) e no estator (f.c.e.m) são dadas respectivamente por:

$$E_1 = 4{,}44 . f_1 . N1 . \Phi_m . k_{e1}$$

$$E_2 = 4{,}44 . f_2 . N2 . \Phi_m . k_{e2}$$

Onde:
- E_1 = Força contra eletromotriz induzida no estator;
- E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;
- k_{e1} e k_{e2} = Fator de enrolamento do estator e rotor, respectivamente;
- N_1 e N_2 = Número de espiras do estator e rotor, respectivamente;
- Φ_m = Fluxo de magnetização;
- f_1 = Frequência de alimentação do estator;
- f_2 = Frequência elétrica no rotor. (Igual à f_1 na condição de rotor bloqueado).

Na presença de escorregamento tem-se:

$$f_2 = s . f_1$$

Portanto:

$$E_{2s} = 4{,}44 . s . f_1 . N2 . \Phi_m . k_{e2} \cong s . E_2$$

Esta equação pode ser simplificada, para um estudo mais aproximado da máquina, por:

$$\Phi_m \approx \frac{E_1}{f_1}$$

Que determina sucintamente a relação do fluxo de magnetização entre rotor e estator com a tensão e a frequência aplicada na máquina (estatórica), frequência esta que está relacionada com a rotação no eixo da máquina, não considerando o escorregamento existente entre rotor e estator.

4.6.2 Conjugado Eletromagnético

A interação entre a corrente do rotor e o fluxo produzido por cada polo unitário do campo magnético girante que concatena o condutor do rotor, resulta o conjugado motor, o qual é dado por:

$$C = k . \Phi_m . I_{2s} . \cos\varphi_{2s}$$

Onde:
- k = Constante de conjugado para o número de polos, o enrolamento, as unidades empregadas, etc.;
- $\cos\varphi_{2s}$ = Fator de potência do circuito rotórico;
- Φ_m = Fluxo de magnetização;
- I_{2s} = Corrente rotórica.

Da mesma forma, para um estudo mais aproximado da máquina, esta equação poderá ser simplificada por:

$$C \approx \Phi_m . I_{2s}$$

Que determina a relação existente entre o torque desenvolvido (solicitado) pela máquina, o fluxo de

magnetização entre rotor e estator e a corrente induzida rotórica, que é dada por:

$$I_{2s} = \frac{s \,.\, E_2}{\sqrt{R_2^2 + SX_{d2}^2}} = \frac{s \,.\, E_2}{Z_{2s}}$$

Onde: Z_{2s} = Impedância rotórica;
E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;
s = Escorregamento.

Nota-se então que o conjugado desenvolvido é função do escorregamento, isto é, com o aumento da carga aplicada à máquina, aumenta-se o escorregamento e consequentemente o torque desenvolvido. Esta relação apresenta um limite, com o qual se consegue obter o conjugado máximo, e a partir do qual, aumentando-se o escorregamento aumenta-se a impedância rotórica diminuindo-se o conjugado, conforme descrito no item a seguir.

4.6.3 Conjugado de Partida

Do desenvolvimento do modelo matemático da máquina assíncrona, demonstra-se que o conjugado é descrito por:

$$C_p = k \,.\, E_1^2 \,.\left(\frac{R_2}{R_2^2 + X_{d2}^2} \right)$$

Onde: C_p = Conjugado de partida;
k = Constante de conjugado para o número de polos, o enrolamento, as unidades empregadas, etc.;
E_1 = Tensão estatórica;
R_2 = Resistência rotórica;
X_{d2} = Reatância rotórica.

Da equação acima pode-se fazer as seguintes considerações:

- No instante da partida, o conjugado não é afetado pela natureza da carga aplicada;
- Desde que para um dado motor de indução tipo gaiola a resistência efetiva do rotor e a reatância de rotor bloqueado sejam constantes, a expressão pode ser escrita por:

$$C_p = k' \,.\, E_1^2$$

Ou seja, o torque de partida é apenas função da tensão aplicada ao enrolamento do estator. Ao reduzir-se a tensão nominal, também se reduzirá a corrente secundária e a primária. Este processo de diminuição da corrente de partida é bastante utilizado nos médios e grandes motores do tipo gaiola, nos casos onde a acentuada redução do conjugado de partida não comprometa o acionamento da carga.

4.6.4 Distribuição de potências e perdas

No caso de um acionamento em que a potência solicitada ao motor permanece constante ao longo do tempo, a determinação da potência é relativamente simples, conhecidos o conjugado resistente da carga e a rotação de funcionamento, tem-se:

$$P = \frac{C \,.\, n}{k}$$

É importante ter em mente que a potência solicitada ao motor é definida pelas características da carga, isto é, independentemente da potência nominal do motor.
A potência transmitida à carga pelo eixo do motor é menor que a potência absorvida da rede, devido às perdas no motor. Essas perdas podem ser classificadas em:

- Perdas joule no enrolamento estatórico (perdas no cobre);
- Perdas joule no enrolamento (ou gaiola) rotórico;
- Perdas por atrito e ventilação;
- Perdas magnéticas no núcleo (perdas no ferro).

A Figura 4.6 representa a distribuição destas perdas:

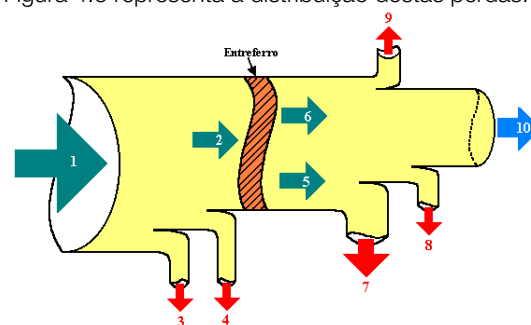



Figura 4.6: Distribuição da potência e de perdas em máquinas assíncronas.

Onde: (1) Potência aparente elétrica da rede [(1) = (2)+(3)+(4)];
(2) Potência aparente elétrica do estator a ser transferida ao rotor [$E_1.I_2' = E_2.I_2$];
(3) Perdas primárias (estator) no ferro;
(4) Perdas primárias (estator) no cobre;
(5) Potência aparente elétrica no rotor [$sE_2.I_2$]→ perdas devido ao escorregamento;
(6) Potência mecânica no eixo [$(1- s).E_2.I_2$];
(7) Potência elétrica no rotor que pode ser recuperável, no caso do rotor estar ligado a uma rede externa por meio de anéis;
(8) Perdas elétricas dissipadas no rotor;
(9) Perdas por atrito e ventilação;
(10) Potência resultante no eixo [potência mecânica (6) - perdas por atrito e ventilação (9)];

Para o caso de acionamento de um motor de indução por conversor de frequência, a forma de onda da corrente produzida pelos conversores não é perfeitamente senoidal, pois contém diversas harmônicas, inclusive as de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem. Portanto as perdas nos motores são maiores.
Além disso, para operações acima da frequência nominal (50 ou 60 Hz), haverá uma redução adicional de conjugado, a qual se deve ao aumento das perdas no ferro do motor.
Para utilização de motores em frequências superiores à nominal devem, portanto ser considerados o aumento das perdas no ferro e também as velocidades limites, função da força centrífuga nos enrolamentos rotóricos e outras partes mecânicas, como por exemplo, esforço adicional nos rolamentos devido ao desbalanceamento do rotor bem como a velocidade limite do mesmo.

4.7 CONJUGADO

O conjugado, também chamado de torque ou binário, é a medida do esforço necessário para girar o eixo. Para medir o esforço necessário para fazer girar o eixo não basta definir a força empregada, é preciso também dizer a que distância do eixo a força é aplicada. O esforço é medido pelo conjugado, que é o produto da força pela distância.

$$C = F \cdot \ell$$

A unidade utilizada para o conjugado no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Newton.metro (N.m).

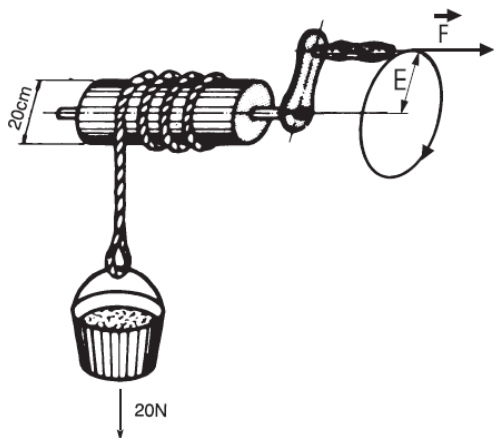



Figura 4.7: Conjugado (exemplo)

Exemplo:
Deseja-se levantar um peso por um processo semelhante ao usado em poços, onde, a força F que é preciso aplicar à manivela, depende do comprimento (ℓ) da manivela. Quanto maior for a manivela, menor será a força necessária para suspender o balde. Se o balde pesa 20N e o diâmetro do tambor é 0,20m, a corda transmitirá uma força de 20N na superfície do tambor, isto é, a 0,10m do centro do eixo. Para contrabalançar esta força, precisam de 10N na manivela, se o comprimento ℓ for de 0,20m. Se ℓ for o dobro, isto é, 0,40m, a força F será a metade, ou seja 5N. Neste caso, o conjugado será:

$$C = F \cdot \ell = 20N \cdot 0{,}10m = 10N \cdot 0{,}20m = 5N \cdot 0{,}40m$$

$$C = 2{,}0N \cdot m$$

4.8 ENERGIA E POTÊNCIA MECÂNICA

A potência mede a rapidez com que a energia é aplicada ou consumida. Como no exemplo anterior, a energia gasta ou o trabalho realizado para trazer o balde do fundo até a superfície é sempre a mesma, porém a potência exprime a rapidez com que esta energia é aplicável para erguer o balde até a boca, ou seja, a potência é a energia ou trabalho total realizado dividido pelo tempo total para realizá-lo. A unidade utilizada para a potência mecânica no SI é o Watt (W), porém a unidade mais usual para a potência mecânica é o c.v.(cavalo-vapor), equivalente a 736W.

$$W_{mec} = F \cdot d \quad \text{(N.m)}$$

$$P_{mec} = \frac{F \cdot d}{t} \quad \text{(W)}$$

$$P_{mec} = \frac{F \cdot d}{736 \cdot t} \quad \text{(cv)}$$

Ainda, considerando-se que a velocidade linear é a razão da distância pelo tempo:

$$P_{mec} = F \cdot v \quad \text{(W)}$$

$$P_{mec} = \frac{F \cdot v}{736} \quad \text{(cv)}$$

Lembrando que, 1N.m = 1J = W.Δt.
Da mesma forma, analogamente para movimentos circulares temos:

$$C = F \cdot r \quad \text{(N.m)}$$

$$v_{angular} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad \text{(m/s)}$$

e

$$v_{angular} = \frac{d_{angular}}{t}$$

Isolando os valores de $d_{angular}$ e F nas equações acima, e substituindo-os na equação abaixo;

$$P_{mec} = \frac{F \cdot d_{angular}}{736 \cdot t} \quad \text{(cv)}$$

Obtemos a seguinte relação de torque e rotação por potência:

$$P_{mec} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{C \cdot n}{736} \quad \text{(cv)}$$

Onde: C = conjugado em N.m;
F = força em N;
r = raio da polia em m;
v = velocidade angular em m/s;
d = diâmetro da peça em m;
n = velocidade em rpm.

4.9 ENERGIA E POTÊNCIA ELÉTRICA

Embora a energia seja uma só, ela pode ser obtida de formas diferentes. Se ligar uma resistência a uma rede elétrica com tensão, passará uma corrente elétrica que irá aquecer a resistência. A resistência absorve energia e a transforma em calor, que também é uma forma de energia. Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede e a transforma em energia mecânica disponível na ponta do eixo.

4.10 CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA

- Resistência

No caso de "***resistências***", quanto maior a tensão da rede, maior será a corrente e mais depressa a resistência irá se aquecer. Isto quer dizer que a potência elétrica será maior. A potência elétrica absorvida da rede, no caso da resistência, é calculada multiplicando-se a tensão da rede pela corrente, se a resistência (carga), for monofásica.

$$P = U \,.\, I \qquad \text{(W)}$$

No sistema trifásico a potência em cada fase da carga será $P_f = U_f \,.\, I_f$, como se fosse um sistema monofásico independente. A potência total será a soma das potências das três fases, ou seja:

$$P = 3 \,.\, P_f = 3 \,.\, U_f \,.\, I_f$$

Lembrando que o sistema trifásico é ligado em estrela ou triângulo, tem-se as seguintes relações:

Ligação estrela:

$$U = \sqrt{3} \,.\, U_f \quad \text{e} \quad I = I_f$$

Ligação triângulo:

$$U = U_f \quad \text{e} \quad I = \sqrt{3} \,.\, I_f$$

Assim, a potência total, para ambas as ligações, será:

$$P = \sqrt{3} \,.\, U \,.\, I \qquad \text{(W)}$$

Obs.: esta expressão vale para a carga formada por resistências, onde não há defasagem da corrente em relação a tensão.

4.11 POTÊNCIA ELÉTRICA

- Cargas Reativas

Para as "***cargas reativas***", ou seja, onde existe defasagem, como é o caso dos motores de indução, esta defasagem tem que ser levada em conta e a expressão fica:

$$P = \sqrt{3} \,.\, U \,.\, I \,.\, \cos\varphi \,.\, \eta \qquad \text{(W)}$$

A unidade de medida usual para potência elétrica é o watt (W), correspondente a 1 volt x 1 ampère, ou seu múltiplo, o quilowatt = 1000 watts. Esta unidade também é utilizada para a medida de potência mecânica.
A unidade de medida usual para energia elétrica é o quilowatt-hora (kWh) correspondente à energia fornecida por uma potência de um quilowatt funcionando durante uma hora – é a unidade que aparece, para cobrança, nas contas de luz.

4.12 VELOCIDADE NOMINAL

É a velocidade (rpm) do motor funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. A velocidade nominal depende do escorregamento e da velocidade síncrona.

$$n = n_S \,.\left(1 - \frac{s\,\%}{100}\right) \qquad \text{(rpm)}$$

A velocidade síncrona n_S é função do número de polos e da frequência de alimentação:

$$n_S = \frac{120.\,f}{2p} \qquad \text{(rpm)}$$

4.13 RELAÇÃO ENTRE CONJUGADO E POTÊNCIA

Quando a energia mecânica é aplicada sob a forma de movimento rotativo, a potência desenvolvida depende do conjugado C e da velocidade de rotação n. As relações são:

$$P(cv) = \frac{C(kgfm)\,.\,n(rpm)}{716} = \frac{C(Nm)\,.\,n(rpm)}{7024}$$

$$P(kW) = \frac{C(kgfm)\,.\,n(rpm)}{974} = \frac{C(Nm)\,.\,n(rpm)}{9555}$$

Inversamente:

$$C(kgfm) = \frac{716\,.\,P(cv)}{n(rpm)} = \frac{974\,.\,P(kW)}{n(rpm)}$$

$$C(Nm) = \frac{7024.\,P(cv)}{n(rpm)} = \frac{9555.\,P(kW)}{n(rpm)}$$

Relação entre Unidades de Potência

$$P(kW) = 0{,}736\,.\,P(cv)$$

$$P(c.v) = 1{,}359\,.\,P(kW)$$

4.14 POTÊNCIA APARENTE, ATIVA E REATIVA

- Potência aparente (S):

É o resultado da multiplicação da tensão pela corrente ($S = U \,.\, I$ para sistemas monofásicos e $S = \sqrt{3} \,.\, U \,.\, I$, para sistemas trifásicos). Corresponde a potência real ou "***potência ativa***" que existiria se não houvesse defasagem da corrente, ou seja, se a carga fosse formada por resistência. Então,

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \qquad \text{(VA)}$$

Para as cargas resistivas, cosφ = 1 e a potência ativa possui a mesa amplitude da potência aparente. A

unidade de medidas para potência aparente é o volt-ampère (VA) ou seu múltiplo, o quilovolt-ampère (kVA).

- Potência ativa (P):

É a parcela da potência aparente que realiza trabalho, ou seja, que é transformada em energia.

$$P = \sqrt{3}\,.\,U\,.\,I\,.\cos\varphi \quad \text{(W)}$$

ou, $$P = S\,.\cos\varphi \quad \text{(W)}$$

- Potência reativa (Q):

É a parcela da potência aparente que não realiza trabalho. Apenas é transferida e armazenada nos elementos passivos (capacitores e indutores) do circuito.

$$Q = \sqrt{3}\,.U.I.sen\varphi \quad \text{(v.a.r.)}$$

$$Q = S\,.\,sen\,\varphi \quad \text{(v.a.r.)}$$

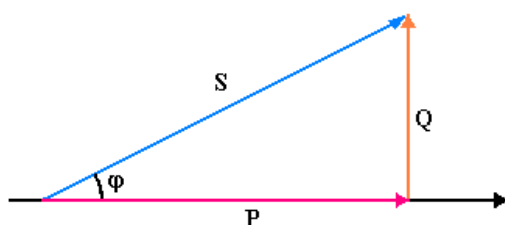



Figura 4.8: Triângulo de potências

Onde: S = potência aparente;
P = potência ativa;
Q = potência reativa.

4.15 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência, indicado por cosφ, onde φ é o ângulo de defasagem da tensão em relação à corrente; é a relação entre a potência real (ativa) P e a potência aparente S.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P(W)}{\sqrt{3}\,.U\,.I}$$

Assim,
- Carga Resistiva: cosφ =1;
- Carga Indutiva: cosφ atrasado;
- Carga Capacitiva: cosφ adiantado.

Os termos, atrasado e adiantado, referem-se à fase da corrente em relação à fase da tensão.

4.16 RENDIMENTO

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha e a transforma em energia mecânica disponível no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação. Chamado potência útil (Pu), a potência mecânica disponível no eixo e, potência absorvida (Pa), a potência elétrica que o motor retira da rede, o rendimento será a relação entre as duas, ou seja:

$$\eta\% = \frac{Pu(W)}{Pa(W)}.100 = \frac{P(W)}{\sqrt{3}\,.U\,.I\,.\cos\varphi}.100 = \frac{736\,.P(cv)}{\sqrt{3}\,.U\,.I\,.\cos\varphi}.100$$

Importância do Rendimento

É importante que o motor tenha um rendimento alto, por dois motivos:
- Perdas baixas consistem em um menor aquecimento do motor, podendo significar num motor mais compacto e menor dissipação térmica para o ambiente;
- Quanto maior o rendimento, menor a potência absorvida da linha, e, portanto, menor o custo da energia elétrica paga nas contas mensais.

O rendimento varia com a carga do motor. Os catálogos dos motores WEG, indicam os valores típicos do rendimento em função da carga. Estes valores são representados genericamente na Figura 4.9.

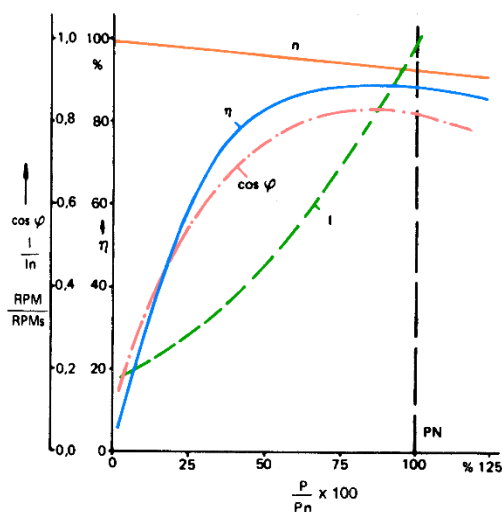



Figura 4.9: Curvas características típicas de motores de indução trifásicos

Onde: I – corrente;
I_n – corrente nominal;
P– potência;
P_n– potência nominal;
RPM – rotação;
$RPMs$ – rotação síncrona;
η – rendimento;
$cos\ \varphi$– fator de potência.

4.17 CORRENTE NOMINAL

É a corrente que o motor absorve da rede quando funciona à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. O valor da corrente nominal depende do rendimento (η) e do fator de potência (cosφ) do motor:

$$I = \frac{P(kW)\,.1000}{\sqrt{3}\,.\,U.\,\eta\,.\cos\varphi} = \frac{736\,.\,P(cv)}{\sqrt{3}\,.\,U.\,\eta\,.\cos\varphi} \quad \text{(A)}$$

Os valores típicos de corrente, rendimento e fator de potência dos motores WEG de II, IV, VI e VIII polos, são mostrados nos catálogos dos motores das linhas padronizadas.

5 CARACTERÍSTICAS DA REDE DE ALIMENTAÇÃO

5.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ALTERNADA TRIFÁSICA

O sistema trifásico é formado pela associação de três sistemas monofásicos de tensões V_1, V_2 e V_3 tais que a defasagem entre elas seja de 120° (Figura 5.1).
O enrolamento deste tipo de motor é constituído por três conjuntos de bobinas dispostas simetricamente no espaço, formando entre si também um ângulo de 120°. Para que o sistema seja equilibrado, isto é, $V_1 = V_2 = V_3$ o número de espiras de cada bobina também deverá ser igual.

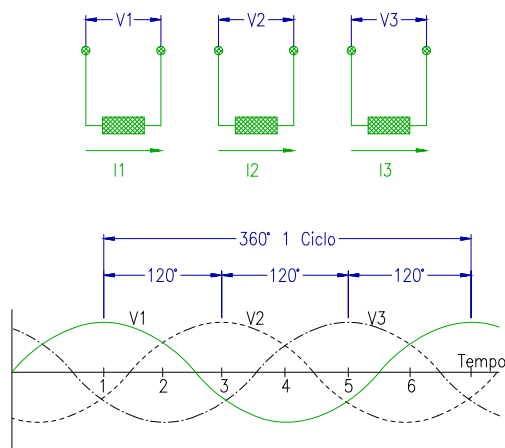



Figura 5.1: Sistema trifásico

A ligação dos três sistemas monofásicos para se obter o sistema trifásico é feita usualmente de duas maneiras, representadas nos esquemas seguir.

5.1.1 Ligações no Sistema Trifásico

a) Ligação Triângulo:
Chamamos "***tensões/correntes de fase***" as tensões e correntes de cada um dos três sistemas monofásicos considerados, indicados por V_f e I_f.
Se ligarmos os três sistemas monofásicos entre si, como indica a Figura 5.2(a), podemos eliminar três fios, deixando apenas um em cada ponto de ligação, e o sistema trifásico ficará reduzido a três fios U, V e W.
A tensão entre dois quaisquer destes três fios chama-se "***tensão de linha***" (V_L), que é a tensão nominal do sistema trifásico. A corrente em qualquer um dos fios chama-se "***corrente de linha***" (I_L).

Examinando o esquema da Figura 5.2(b), vê-se que:
1) A cada carga é aplicada a tensão de linha V_L, que é a própria tensão do sistema monofásico correspondente, ou seja, $V_L = V_f$:
2) A corrente em cada fio de linha, ou corrente de linha IL, é a soma das correntes das duas fases ligadas a este fio, ou seja, $I_L = I_{f1} + I_{f3}$. Como as correntes estão Defasadas entre si, a soma deverá ser feita graficamente como mostra a Figura 5.2(c). Pode-se mostrar que: $I_L = I_f \cdot \sqrt{3}$.

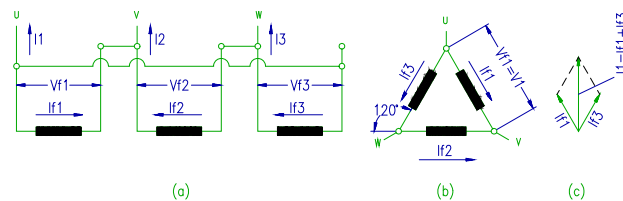



Figura 5.2: Ligação triângulo

<u>Exemplo:</u> Temos um sistema trifásico equilibrado de tensão nominal 4160V. A corrente de linha (I_L) medida é 50A. Ligando a este sistema uma carga trifásica composta de três cargas iguais ligadas em triângulo, qual a tensão e a corrente em cada uma das cargas?

Temos $V_f = V_L = 4160\text{V}$ em cada uma das cargas.
se $I_L = I_1 \cdot \sqrt{3} \,.\, I_f$, então
$I_f = 0{,}577 \cdot I_1 = 0{,}577 \,.\, 50 = 28{,}87\,\text{A}$ em cada uma das cargas.

b) Ligação Estrela:
Ligando um dos fios de cada sistema monofásico a um ponto comum aos três, os três fios restantes formam um sistema trifásico em estrela, como mostra a Figura 5.3(a).
Às vezes, o sistema trifásico em estrela é "***a quatro fios***" ou "***com neutro acessível***".
O quarto fio é ligado ao ponto comum as três fases. A tensão de linha, ou tensão nominal do sistema trifásico, e a corrente de linha são definidos do mesmo modo que na ligação triângulo.
Examinando o esquema da Figura 5.3(b) vê-se que:
1) A corrente em cada fio da linha, ou corrente de linha (I_l ou I_L), é a mesma corrente da fase à qual o fio está ligado, ou seja, $I_L = I_f$.
2) A tensão entre dois fios quaisquer do sistema trifásico é a soma gráfica Figura 5.3(c) das tensões das duas fases as quais estão ligados os fios considerados, ou seja, $V_L = V_f \cdot \sqrt{3}$.

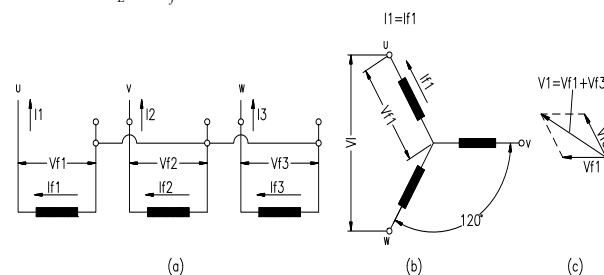



Figura 5.3: Ligação estrela

Exemplo:
Temos uma carga trifásica composta de três cargas iguais, cada carga é feita para ser ligada a uma tensão de 2400V, absorvendo 28,87A. Qual a tensão nominal do sistema trifásico que alimenta esta carga em suas condições normais (2400V e 28,87A) e qual a corrente de linha (I_1)?
Temos V_f = 2400V (nominal de cada carga)

$$V_1 = \sqrt{3} \,.\, 2400\text{V} = 4160\text{V}$$
$$I_1 = I_f = 28{,}87\text{A}$$

5.2 TENSÃO NOMINAL

É a tensão de rede para a qual o motor foi projetado. As tensões trifásicas mais usadas para redes de média tensão são: 2300, 3300, 4000, 4160, 6600 e 13800V.

5.2.1 Tensão da rede de alimentação em função da potência do motor

Atualmente não há um padrão mundial para a escolha da tensão de alimentação em função da potência do motor. Entre os principais fatores que são considerados, podemos citar:

- Nível de tensão disponível no local;
- Limitações da rede de alimentação com referência à corrente de partida;
- Distância entre a fonte de tensão (subestação) e a carga;
- Custo do investimento, entre baixa e alta tensão para potências entre 150 e 450kW.

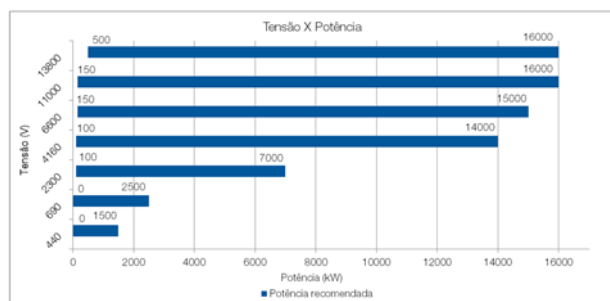



Figura 5.4: Tensões normalmente utilizadas em função da potência do motor.

5.3 FREQUÊNCIA NOMINAL

É a frequência da rede para o qual o motor foi projetado.

5.3.1 Ligação em Frequências Diferentes

Motores trifásicos bobinados para 50Hz poderão ser ligados também em rede de 60Hz, porém:

a) Ligando o motor de 50Hz, com a mesma tensão, em 60Hz:

- A potência disponível do motor será a mesma;
- A corrente nominal será a mesma;
- A corrente de partida diminui em 17%;
- O conjugado de partida diminui em 17%;
- O conjugado máximo diminui em 17%;
- A velocidade nominal aumenta em 20%;

NOTA

Deverão ser observados os valores de potência requeridas, para motores que acionam equipamentos que possuem conjugados variáveis com a rotação.

b) Ligando o motor de 50Hz em 60Hz, alterando a tensão na mesma proporção da frequência:

- Aumenta a potência disponível do motor em 20%;
- A corrente nominal será a mesma;
- A corrente de partida será aproximadamente a mesma;
- O conjugado de partida será aproximadamente o mesmo;
- O conjugado máximo será aproximadamente o mesmo;
- A rotação nominal aumenta 20%.

c) Ligando o motor de 60Hz em 50Hz, alterando a tensão na mesma proporção da frequência:

- Reduz a potência disponível do motor em 17%;
- A corrente nominal será a mesma;
- A corrente de partida será aproximadamente a mesma;
- O conjugado de partida será aproximadamente o mesmo;
- O conjugado máximo será aproximadamente o mesmo;
- A rotação nominal diminui 17%.

NOTA

Para motores de 60Hz que serão ligados em 50Hz, isto só é possível se a tensão do motor em 50Hz for 20% abaixo da tensão em 60Hz, pois desta forma o fluxo permanecerá praticamente o mesmo da frequência anterior e sendo assim as características elétricas serão aproximadamente as mesmas da frequência de 60Hz.

5.4 TOLERÂNCIA NA VARIAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA

Conforme a IEC o motor elétrico de indução deve ser capaz de funcionar de maneira satisfatória dentro das possíveis combinações das variações de tensão e frequência classificadas em zona A ou zona B, conforme Figura 5.5:

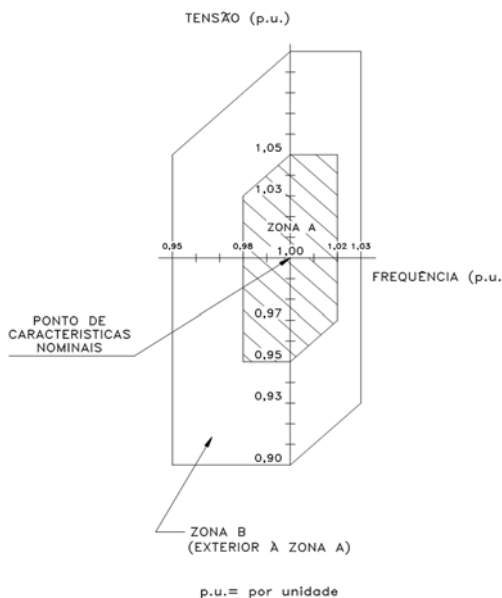



Figura 5.5: Limites das variações de tensão e de frequência em funcionamento.

Ainda, quanto aos limites de tensão e frequência, a norma define um acréscimo na elevação de temperatura ou na temperatura total do motor quando há uma variação simultânea da tensão e da frequência. Para as condições de operação nos limites da zona A (ver Figura 5.5), as elevações de temperatura e a temperatura total podem exceder em aproximadamente 10K os limites especificados, em contra partida o motor deve assegurar o seu conjugado nominal. Quanto as características de

desempenho, elas podem sofrer variações (tanto na *zona A* quanto na *zona B* - mais acentuada nesta última, por este motivo a IEC recomenda o não funcionamento prolongado na periferia da *zona B*), entretanto a norma não estabelece os limites. Assim sendo, o motor deve ser capaz de funcionar dentro das *zonas A* e *B*, fornecendo conjugado nominal.
O efeito "***aproximado***" da variação da tensão sobre as características do motor é mostrado na Tabela 5.1. Esses valores podem variar de motor para motor ou de um motor pequeno para um grande, ou ainda, de um tipo de refrigeração para outro. Ver Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Efeito aproximado da variação de tensão sobre as características do motor

Desempenho do Motor	Tensão 20% acima da nominal	Tensão 10% acima da nominal	Tensão 10% abaixo da nominal
Conjugado de partida	Aumenta 44%	Aumenta 21%	Diminui 19%
Corrente de partida	Aumenta 25%	Aumenta 10 a 12%	Diminui 10 a 12%
Corrente de plena carga	Diminui 11%	Diminui 7%	Aumenta 11%
Escorregamento	Diminui 30%	Diminui 17%	Aumenta 23%
Rotação	Aumenta 1,5%	Aumenta 1%	Diminui 1,5%
Rendimento	Pequeno aumento	Aumenta 1%	Diminui 2%
Fator de potência	Diminui 5 a 15%	Diminui 3%	Aumenta 1%
Temperatura	Diminui 5°C	Diminui 3°C	Aumenta 6°C
Ruído magnético sem carga	Aumento perceptível	Ligeiro aumento	Ligeira diminuição

6 MOTORES ASSÍNCRONOS DE ALTA TENSÃO WEG

6.1 NORMAS APLICÁVEIS

As máquinas são projetadas, fabricadas e testadas segundo as Normas ABNT, IEC, NEMA, DIN entre outras, onde aplicáveis:

Tabela 6.1: Correspondência numérica entre normas de motores de indução.

Assunto	Entrada Normativa 1)				
	IEC	*ABNT (NBR)*	*NEMA (EUA)*	*DIN / VDE Alemanha*	*CSA Canadá*
Especificação	60034-1 60034-12	17094	MG 1 Parte 1, 10 e 20	DIN EN 60034-1 DIN EN 60034-12 DIN VDE 0530-8	C 22.2 Nº 100
Padronização Dimensões	60072	15623	MG 1 Parte 4	DIN 42673-1 DIN 42677-1	2)
Método de Ensaio	60034-2	5383-1	MG 1 Parte 1, 3 e 12	DIN EN 60034-2 DIN VDE 0530-8	C 22.2 Nº 100
Formas construtivas	60034-7	5031	MG 1 Parte 4	DIN EN 60034-7	2)
Graus de proteção	60034-5	NBR IEC 60034-5	MG 1 Parte 5	DIN EN 60034-5	2)
Métodos de resfriamento	60034-6	5110	MG 1 Parte 6	DIN EN 60034-6	2)
Limites de vibração	60034-14	17094	MG 1 Parte 7	DIN EN 60034-14	2)
Nível de ruído	60034-9	NBR IEC 60034-9	MG 1 Parte 9	DIN EN 60034-9	2)
Padronização Potência x Carcaça	-	-	MG 1 Parte 13	DIN 50347	2)
Equipamento elétrico para atmosferas explosivas	60079- 0 60079-10 60079-14	NBR IEC 60079-0			C22.2N.145M
Proteção Ex-n	60079-15				
Proteção Ex-e	60079- 7	NBR IEC 60079-7			
Proteção Ex-p	60079- 2 60079-13	NBR IEC 60079-2 NBR IEC 60079-13			
Proteção Ex-d	60079- 1	NBR IEC 60079-1			

NOTAS

1) A correspondência indicada não significa que as normas são equivalentes;
2) Adotam as normas CEMA - equivalentes às normas NEMA.

6.2 ORIENTAÇÃO PARA SELEÇÃO DE MOTORES

6.2.1 Linha Master "M"

A linha de motores de indução "***M***" é fabricada da carcaça 280 até 1800, normalmente até 14 polos (com fabricação possível em carcaça e polaridades maiores), tensões variando de 220V a 13,8 kV com potências de 100 a 50.000 kW, atendendo as exigências das normas citadas anteriormente nas suas últimas versões.

<u>Códigos dos modelos:</u>

NOTA

As potências descritas nos catálogos WEG são válidas para as seguintes condições:

- Temperatura ambiente até 40ºC;
- Altitude da instalação até 1000m;
- Frequência de 60Hz;
- Fator de serviço = 1.0;
- Partida com tensão plena;
- Regime de serviço S1 (contínuo);
- Elevação de temperatura 80ºC.

6.2.2 Linha High Performance "H"

A linha de motores de indução "H" é fabricada da carcaça 315 até 630, normalmente até 14 polos e tensão variando de 220V a 6,9 kV com potências de 100 a 3150kW, atendendo as exigências das normas citadas anteriormente nas suas últimas versões.

Códigos dos modelos:

NOTA

As potências descritas nos catálogos WEG são válidas para as seguintes condições:
- Temperatura ambiente até 40ºC;
- Altitude da instalação até 1000m;
- Frequência de 60Hz;
- Fator de serviço = 1.0;
- Partida com tensão plena;
- Regime de serviço S1 (contínuo);
- Elevação de temperatura 80ºC.

6.2.3 Linha “W” Manto d’água

A linha de motores de indução "W" é fabricada da carcaça 315 até 560, normalmente até 8 polos, tensões variando de 220V a 13,8 kV com potências de 100 a 2.500 kW, atendendo as exigências das normas citadas anteriormente nas suas últimas versões.

Códigos dos modelos:

NOTA

As potências descritas nos catálogos da Linha WGM WEG são válidas para as seguintes condições:
- Temperatura ambiente até 40ºC;
- Temperatura de entrada de água até 38ºC;
- Altitude da instalação até 1000m;
- Frequência de 60Hz;
- Fator de serviço = 1.0;
- Partida com tensão plena;
- Regime de serviço S1 (contínuo);
- Elevação de temperatura 105ºC.

6.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O motor de indução trifásico (Figura 6.1) é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor.

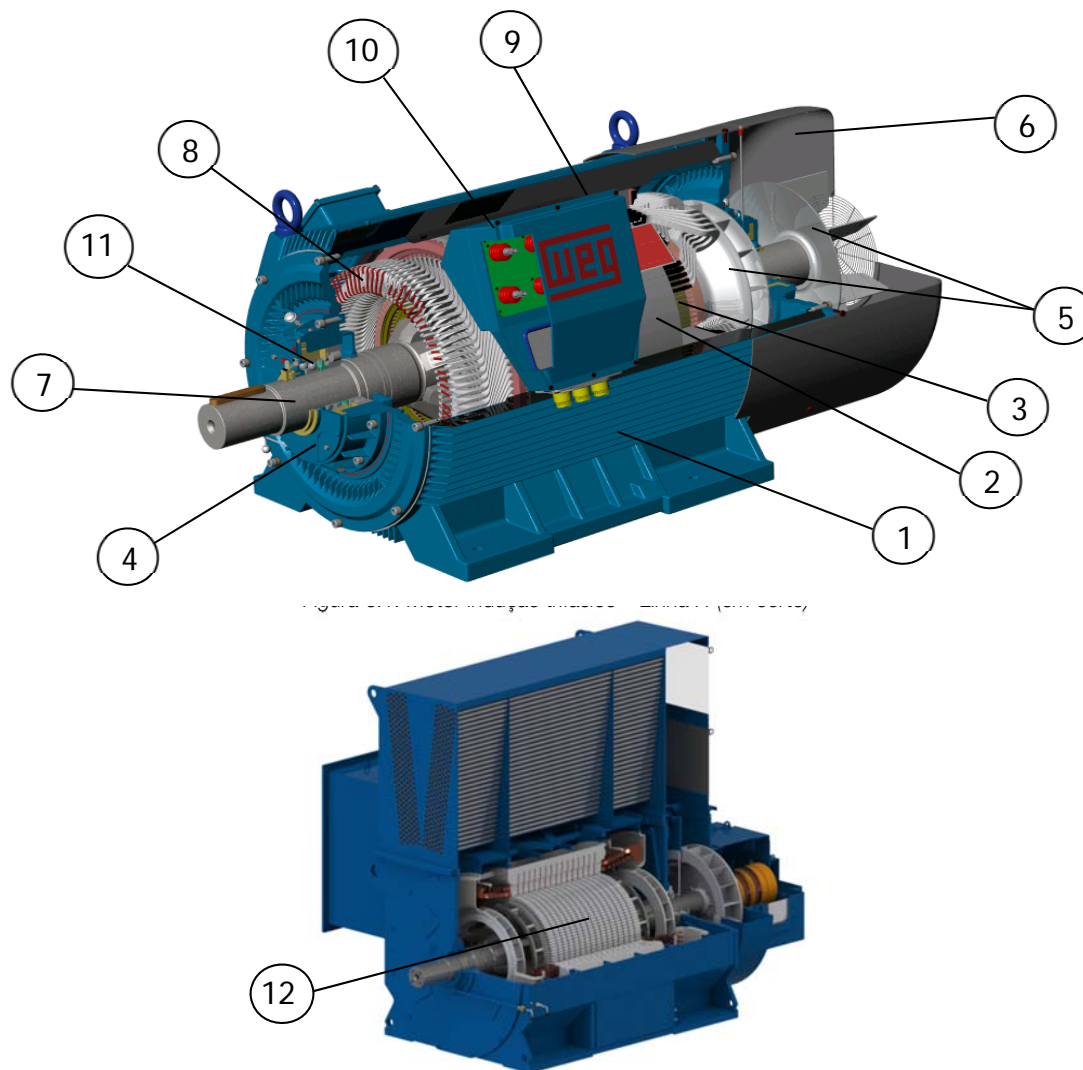



Figura 6.2: Motor indução trifásico – Linha M (em corte)

<u>Estator:</u>

- Carcaça (1): É a estrutura suporte do conjunto; de constituição robusta em ferro fundido ou aço soldado, resistente à corrosão;
- Núcleo de chapas (2): As chapas são de aço magnético (geralmente em aço-silício), tratadas termicamente e com a superfície isolada para reduzir ao mínimo as perdas no ferro;
- Enrolamento trifásico (8): Três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação.

<u>Rotor:</u>

- Eixo (7): Em aço, transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga;
- Núcleo de chapas (3): As chapas possuem as mesmas características das chapas do estator;
- Gaiola ou enrolamento do rotor (12): É composta de barras e anéis de curto-circuito no motor tipo gaiola e de bobinas em motor tipo de anéis. Pode ser de cobre eletrolítico, latão ou de alumínio injetado.

<u>Outras partes do motor de indução trifásico</u>:

- Tampas do mancal (4);
- Ventilador interno e externo (5);
- Tampa defletora ou proteção do ventilador (6);
- Caixa de ligação de força (9);
- Placa de bornes com isolador e pino de ligação (10);
- Rolamento (11).

7 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE

A potência admissível do motor de indução é determinada levando-se em consideração, principalmente, dois fatores:

- Altitude em que o motor será instalado;
- Temperatura do meio refrigerante.

Conforme a NBR-17094, as condições usuais de serviço são:

a) Altitude não superior a 1000m acima do nível do mar;
b) Meio refrigerante (na maioria dos casos, o ar ambiente) com temperatura não superior a 40ºC e isenta de elementos prejudiciais.

Até estes valores de altitude e temperatura ambiente, considera-se condições normais e o motor deve fornecer, sem sobreaquecimento, sua potência nominal.

7.1 ALTITUDE

Motores funcionando em altitudes acima de 1000m acima do nível do mar, apresentam problemas de aquecimento causado pela rarefação de ar e, consequentemente, diminuição de seu poder de arrefecimento.
A insuficiente troca de calor entre o motor e o ar circundante, leva a exigência de redução de perdas, o que significa, também, redução de potência.
Os motores têm aquecimento diretamente proporcional às perdas e estas variam, aproximadamente, numa razão quadrática com a potência.
Existem três soluções possíveis para instalação e um motor acima de 1000m do nível do mar, se dimensionado para 1000m e 40°C:

a) Com o uso de material isolante de classe superior, é possível tirar a potência original;
b) Usar motores com fator de serviço maior que 1,0 (1,15 ou maior), desde que seja requerida pela carga somente a potência nominal do motor;
c) Reduzir em 1% a potência requerida para cada 100m de elevação na altitude acima de 1000m, isto para a mesma temperatura ambiente.

7.2 TEMPERATURA AMBIENTE

Motores que trabalham em temperaturas inferiores a -20ºC, apresentam os seguintes problemas:

a) Excessiva condensação, exigindo drenagem adicional ou instalação de resistência de aquecimento, caso o motor fique longos períodos parado;
b) Formação de gelo nos mancais (para ambientes com temperaturas abaixo de 0ºC), provocando endurecimento das graxas ou lubrificantes nos mancais, exigindo o emprego de lubrificantes especiais ou graxa anticongelante, conforme especificado no Manual de Instalação e Manutenção WEG.

Em motores que trabalham em temperaturas ambientes constantemente superiores a 40ºC, o enrolamento pode atingir temperaturas prejudiciais à isolação. Este fato tem que ser compensado por um projeto especial do motor, usando materiais isolantes especiais (de classe superior) ou pela redução da potência nominal do motor.

7.3 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR NAS DIVERSAS COMBINAÇÕES DE TEMPERATURA E ALTITUDE

Associando os efeitos da variação da temperatura e da altitude, a capacidade de dissipação da potência de perdas do motor pode ser obtida multiplicando-se a potência útil (ou a potência nominal a 40°C e 1000m) pelo fator de multiplicação obtido na Tabela 7.1:

Tabela 7.1: Fator de multiplicação da potência útil em função da temperatura ambiente (T) em "°C" e de altitude do nível do mar (H) em "m".

T \ H	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10	-	-	-	-	-	-	0,99
15	-	-	-	-	-	1,00	0,94
20	-	-	-	-	1,00	0,95	0,90
25	-	-	-	1,00	0,96	0,90	0,85
30	-	-	1,00	0,96	0,90	0,86	0,81
35	-	1,00	0,95	0,90	0,85	0,81	0,77
40	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,72
45	0,94	0,89	0,84	0,80	0,76	0,72	0,68
50	0,88	0,83	0,79	0,75	0,71	0,67	0,64
55	0,82	0,77	0,73	0,70	0,66	0,63	0,60
60	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62	0,59	0,56

7.4 ATMOSFERA AMBIENTE

7.4.1 Ambientes Agressivos

Ambientes agressivos, tais como estaleiros, instalações portuárias, indústria de pescado e múltiplas aplicações navais, indústria química e petroquímica, exigem que os equipamentos que neles trabalham sejam perfeitamente adequados para suportar tais circunstâncias com elevada confiabilidade, sem apresentar problemas de qualquer espécie.
Para aplicação de motores nestes ambientes agressivos, a WEG desenvolveu uma linha de motores, projetados para atender os requisitos especiais e padronizados para as condições mais severas que possam ser encontradas.
Os motores são protegidos de acordo com o ambiente em que os mesmos serão instalados, e podem ter as seguintes características especiais:

- Enrolamento duplamente impregnado;
- Pintura anticorrosiva (epóxi), internamente e externamente;
- Placa de identificação de aço inoxidável;

- Elementos de montagem zincados;
- Ventilador de material não faiscante;
- Vedação específicas para cada tipo de mancal, entre o eixo e as tampas;
- Juntas de borracha para vedar caixa de ligação.

7.4.2 Ambientes Contendo Poeiras ou fibras

Para analisar se os motores podem ou não trabalhar nestes ambientes, devem ser informados os seguintes dados: tamanho e quantidade aproximada das fibras contidas no ambiente. O tamanho e a quantidade de fibras são fatores importantes, pois podem provocar no decorrer do tempo, a obstrução da ventilação, e assim, o aquecimento do motor. Quando o conteúdo de fibras for elevado, devem ser empregados filtros de ar ou efetuar a limpeza nos dispositivos de refrigeração ou mesmo nos motores.

7.4.3 Locais em que a Ventilação do Motor é Prejudicada

Nestes casos, existem duas soluções:

1) Utilizar motores sem ventilação, impactando em máquinas sobredimensionadas para que possam dissipar o calor sem um sistema de refrigeração otimizado;
2) Utilizar motores com ventilação por dutos, com trocador de calor ar-água ou com refrigeração através de manto d'água. No caso do motor refrigerado por dutos, calcula-se o volume de ar deslocado pelo ventilador do motor determinando a circulação de ar necessária para perfeita refrigeração do motor. Para o motor com trocador ar-água, a refrigeração é feita pela troca de calor entre a água circulante (circuito externo) e o ar circulante interno (circuito interno) ao trocador. Para motores manto d'água, a refrigeração é feita através de convecção, onde o calor flui do estator para a carcaça onde encontra-se o manto d'água responsável pelo arrefecimento do motor. Os motores refrigerados por dutos e os refrigerados à água possuem a mesma eficiência de troca térmica de um motor aberto.

7.4.4 Áreas de risco

Uma instalação onde produtos inflamáveis são continuamente manuseados, processados ou armazenados, necessita, obviamente, de cuidados especiais que garantam a manutenção do patrimônio e preservem a vida humana. Os equipamentos elétricos, por suas próprias características, podem apresentar fontes de ignição, quer seja pelo centelhamento devido a abertura e fechamento de contatos ou por superaquecimento de algum componente, seja ele intencional ou causado por correntes de defeito.

7.4.5 Atmosfera Explosiva

Uma atmosfera é explosiva quando a proporção de gás, vapor, pó ou fibras é tal, que uma faísca proveniente de um circuito elétrico ou o aquecimento de um aparelho provoca a explosão, para tal, três elementos são necessários: combustível + oxigênio + faísca = explosão.

7.4.6 Classificação das áreas de risco

De acordo com as normas ABNT / IEC, as áreas de risco são classificadas em:
Zona 0: Região onde a ocorrência de mistura inflamável e/ou explosiva é contínua, ou existe por longos períodos. Por exemplo, a região interna de um tanque de combustível. *A atmosfera explosiva está sempre presente;*
Zona 1: Região onde a probabilidade de ocorrência de mistura inflamável e/ou explosiva está associada à operação normal do equipamento e do processo. *A atmosfera explosiva está frequentemente presente;*
Zona 2: Locais onde a presença de mistura inflamável e/ou explosiva não é provável de ocorrer, é por poucos períodos. Está associada à operação anormal do equipamento e do processo. Perdas ou uso negligente. *A atmosfera explosiva pode acidentalmente estar presente.*

De acordo com a norma NEC, as áreas de risco são classificadas em:

Divisão I: Região onde se apresenta uma ALTA probabilidade de ocorrência de uma explosão;
Divisão II: Região de menor probabilidade.

Tabela 7.2: Comparativo entre normas ABNT/IEC E NEC/API.

Normas	Ocorrência de Mistura Inflamável		
	Contínua	Em condição normal	Em condição anormal
ABNT / IEC	Zona 0	Zona 1	Zona 2
NEC / API	Divisão I		Divisão II

Classes e grupos das áreas de risco:
Classes: Referem-se a natureza da mistura. O conceito de classes só é adotado pelas normas NEC e API;
Grupos: O conceito de grupo está associado à composição química da mistura.

Classe I: Gases ou vapores explosivos.
Conforme o tipo de gás ou vapor, temos:
GRUPO B: hidrogênio, butadieno, óxido de eteno;
GRUPO C: éter etílico, etileno;
GRUPO D: gasolina, nafta, solventes em geral.

Classe II: Poeiras combustíveis ou condutoras.
Conforme o tipo de poeira, temos:
GRUPO E
GRUPO F
GRUPO G

Classe III: Fibras e partículas leves e inflamáveis.
De acordo com a norma ABNT/IEC, os grupos de risco são divididos em:
Grupo I: Para minas susceptíveis a liberação de grisú (gás a base de metano);
Grupo II: Para aplicação em outros locais. Sendo divididos em IIA, IIB e IIC.

Tabela 7.3: Correspondência entre Normas (ABNT/IEC e NEC/API.).

Gases / Normas	Grupo de Acetileno	Grupo de Hidrogênio	Grupo de Eteno	Grupo de Propano
ABNT / IEC	Gr. IIC	Gr. IIC	Gr. IIB	Gr. IIA
NEC / API	Classe I Gr. A	Classe I Gr. B	Classe I Gr. C	Classe I Gr. D

Tabela 7.4: Classificação de Áreas Conforme Normas IEC e NEC.

Atmosfera Explosiva	IEC - 79.10	NEC
Gases ou	Zona 0 e Zona 1	Classe I Divisão 1
Vapores	Zona 2	Classe I Divisão 2
Poeiras	Zona 10 Zona 11	Divisão 1 Classe II Divisão 2
Fibras	Zona 10 Zona 11	Divisão 1 Classe III Divisão 2

7.4.7 Classes de temperatura

A temperatura máxima na superfície exposta do equipamento elétrico deve ser sempre menor que a temperatura de ignição do gás ou vapor. Os gases podem ser classificados para as classes de temperatura de acordo com a sua temperatura de ignição, por meio do qual a máxima temperatura de superfície da respectiva classe, deve ser menor que a temperatura dos gases correspondentes.

Tabela 7.5: Classes de temperatura.

IEC		NEC		Temperatura de Ignição dos Gases e/ou Vapores
Classes de Temperatura	Temperatura Máxima de Superfície	Classes de Temperatura	Temperatura Máxima de Superfície	
T1	450	T1	450	450
T2	300	T2	300	300
		T2A	280	280
		T2B	260	260
		T2C	230	230
		T2D	215	215
T3	200	T3	200	200
		T3A	180	180
		T3B	165	165
		T3C	160	160
T4	135	T4	135	135
		T4A	120	120
T5	100	T5	100	100
T6	85	T6	85	85

OBS.: Para a precisa e correta especificação de um motor para trabalhar em uma área de risco são necessários dados da carga (potência consumida, curva, tipo do acoplamento, inércia, etc.) tendo em vista que a temperatura de ignição de muitos gases e/ou vapores é relativamente baixa em comparação com a temperatura do rotor na partida, e esta é em muito influenciada pelo tempo de aceleração.

7.4.8 Equipamentos para Áreas de Risco

A tabela a seguir apresenta o tipo de proteção do equipamento segundo simbologia da ABNT e IEC, indicando qual a sua definição e em quais áreas pode ser aplicado.

*Tabela 7.6: Equipamentos para área de risco. (** Não se aplica a motores da Weg Energia)*

Tipo de Proteção	Simbologia ABNT/IEC	Definição	Área de Aplicação	Norma ABNT/IEC
A Prova de Explosão	Ex-d	Capaz de suportar explosão interna sem permitir que se propague para o meio externo.	Zonas 1 e 2	NBR-5363 IEC-60079.1 EB 239
Segurança Aumentada	Ex-e	Medidas construtivas adicionais aplicadas a equipamentos em que condições normais de operação não produzem arco, centelha ou alta temperatura.	Zonas 1 e 2	NBR-9883 IEC-60079.7
Pressurizado	Ex-p	Invólucro com sobre-pressão interna. O centelhamento ou alta temperatura se dá num meio não contaminado com produto inflamável por ser mantido a uma pressão superior a atmosférica.	Zonas 1 e 2	NBR-5420 IEC-60079.2
Não Acendível	Ex-n	Dispositivos ou circuitos que apenas em condições normais de operação não possuem energia suficiente para inflamar a atmosfera explosiva.	Zona 2	IEC60079-15
Imersão em Óleo (**)	Ex-o	Partes que podem causar centelhas ou alta temperatura se situam em óleo isolante.	Zonas 1 e 2	NBR-8601 IEC-60079-6
Imersão em Areia (**)	Ex-q	Partes que podem causar centelhas ou alta temperatura se situam em areia.	Zonas 1 e 2	IEC-60079-5
Encapsulado em Resina (**)	Ex-m	Partes que podem causar centelhas ou alta temperatura se situam em resina.	Zonas 1 e 2	IEC60031-19
Invólucro Hermético (**)	Ex-h	Invólucro com fechamento hermético (por fusão do material).	Zonas 1 e 2	IEC-60031
Segurança Intrínseca (**)	Ex-i	Dispositivo ou circuito que em condições normais ou anormais de operação não possuem energia suficiente para inflamar a atmosfera explosiva.	Zonas 1 e 2	NBR-8447 IEC60079-11
Invólucro (**)	Ex-t	Tipo de proteção para atmosferas com poeiras combustíveis onde o equipamento elétrico é fornecido com um invólucro que o protege contra o ingresso de poeira e possui meios de limitar as temperaturas de superfície.	Zonas 1 e 2	IEC 60079.31

Os ensaios e certificação desses equipamentos poderão ser desenvolvidos em laboratórios credenciados pelo INMETRO ou em laboratórios do próprio fabricante do equipamento. Neste último caso os ensaios são obrigatoriamente acompanhados por um Inspetor do Órgão Certificador credenciado pelo INMETRO.
O quadro a seguir mostra a seleção dos equipamentos para as áreas classificadas de acordo com a norma ABNT / IEC-60079-14 ou VDE 0165:

Tabela 7.7: Seleção dos equipamentos segundo ABNT / IEC / VDE.

ABNT / IEC-60079-14 / VDE 0165	
Zona 0	Ex-i ou outro equipamento, ambos especialmente aprovados para zona 0
Zona 1	Equipamentos com tipo de proteção: Ex-d, Ex-p, Ex-i, Ex-o, Ex-e, Ex-q, Ex-h, Ex-m
Zona 2	▪ Qualquer equipamento certificado para zona 0 ou 1 ▪ Não acendível (Ex-n)

De acordo com a norma NEC, a relação dos equipamentos está mostrada no quadro abaixo:

Tabela 7.8: Seleção dos equipamentos segundo NEC.

NEC	
Divisão I	Equipamentos com tipo de proteção: Ex-d, Ex-p, Ex-i e Ex-o
Divisão II	▪ Qualquer equipamento certificado para divisão I; ▪ Equipamentos incapazes de gerar faíscas ou superfícies quentes em invólucros de uso geral: não acendíveis.

7.5 GRAUS DE PROTEÇÃO

Os invólucros dos equipamentos elétricos, conforme as características do local em que serão instalados e de sua acessibilidade devem oferecer um determinado grau de proteção. Assim, por exemplo, um equipamento a ser instalado num local sujeito a jatos d'água, deve possuir um invólucro capaz de suportar tais jatos, sob determinados valores de pressão e ângulo de incidência, sem que haja penetração de água.

7.5.1 Código de Identificação

A norma NBR-6146 e IEC-60034-5 definem os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP, seguidas por dois algarismos.
O primeiro algarismo indica o grau de proteção contra penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental, como mostra a Tabela 7.9:

Tabela 7.9: Código de identificação - 1° Algarismo.

1° ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos de dimensões acima de 50 mm
2	Corpos estranhos de dimensões acima de 12 mm
3	Corpos estranhos de dimensões acima de 2,5 mm
4	Corpos estranhos de dimensões acima de 1,0 mm
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor
6	Totalmente protegido contra poeira

O segundo algarismo indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor, como mostra Tabela 7.10:

Tabela 7.10: Código de identificação - 2° Algarismo.

2º ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Pingos de água na vertical
2	Pingos de água até a inclinação de 15º com a vertical
3	Água de chuva até a inclinação de 60º com a vertical
4	Respingos de todas as direções
5	Jatos d'água de todas as direções
6	Água de vagalhões
7	Imersão temporária
8	Imersão permanente

As combinações entre os dois algarismos, isto é, entre os dois critérios de proteção, estão resumidos na Tabela 7.11. Note que, de acordo com a norma, a qualificação do motor em cada grau, no que se refere a cada um dos algarismos, é bem definida através de ensaios padronizados e não sujeita a interpretações, como acontecia anteriormente.

Tabela 7.11: Graus de proteção.

Motor	Classes de Proteção	1° Algarismo		2° Algarismo
		Proteção Contra Contato	Proteção Contra Corpos Estranhos	Proteção Contra Água
Motores abertos	IP 00 IP 02	Não tem Não tem	Não tem Não tem	Não tem Pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical
	IP 11 IP 12 IP 13	Toque acidental com a mão	Corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 50 mm	Pingos de água na vertical Pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical Água de chuva até uma inclinação de 60° com a vertical
	IP 21 IP 22 IP 23 IP24	Toque com os dedos	Corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 12 mm	Pingos de água na vertical Pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical Água de chuva até uma inclinação de 60° com a vertical Respingos de todas as direções
Motores fechados	IP 44	Toque com ferramentas	Corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 1 mm	Respingos de todas as direções
	IP 54 IP 55	Proteção completa contra toque	Proteção contra o acúmulo de poeiras nocivas	Respingos de todas as direções Jatos de água em todas as direções
	IP 65	Proteção completa contra toques	Proteção completa contra o acúmulo de poeiras nocivas	Jatos de água em todas as direções

7.5.2 Tipos Usuais de Proteção

Embora os algarismos indicativos de grau de proteção possam ser combinados de muitas maneiras, somente alguns tipos de proteção são empregados nos casos normais. São eles:

Linha - MGA, MGP, MGV, MAA.
IP 23 ou IP 24 - Motores abertos

Linha - MGF, MGD, MGT, MGI, MGW, MGL, MAF, HGF, WGM.
IP55, IP 65 - Motores fechados.

Ainda, temos algumas letras que adicionadas ao grau de proteção fornecem mais um dado referente ao motor, como segue:
W (IPW24) - proteção contra intempéries;
R (IPR55) - motor com refrigeração por dutos;
S (IP23S) - ensaio de proteção contra a entrada de água é realizado com o motor desligado;
M (IP23M) - ensaio de proteção contra a entrada de água é realizado com o motor ligado.

8 CARACTERÍSTICAS EM REGIME

8.1 ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA - CLASSE DE ISOLAMENTO

8.1.1 Aquecimento no Enrolamento

Perdas:
A potência útil fornecida pelo motor na ponta do eixo é menor que a potência que o motor absorve da linha de alimentação, isto é, o rendimento do motor é sempre inferior a 100%. A diferença entre as duas potências representa as perdas, que são transformadas em calor, o qual aquece o enrolamento e deve ser dissipado para fora do motor, para evitar que a elevação de temperatura ultrapasse os limites de temperatura dos materiais isolantes da bobina.
A maneira pela qual o calor gerado é retirado da máquina está detalhada no capítulo 9.

Dissipação do calor:
O calor gerado pelas perdas no interior do motor é dissipado para o ar ambiente através da superfície externa da carcaça ou de algum dispositivo de refrigeração (trocadores de calor, dutos, manto d'água, etc.). Em motores fechados essa dissipação é normalmente auxiliada pelo ventilador montado no próprio eixo do motor. Uma boa dissipação depende:

- Da eficiência do sistema de ventilação;
- Da área total de dissipação da carcaça;
- Da diferença da temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente.

a) O sistema de ventilação bem projetado, além de ter um ventilador eficiente, capaz de movimentar grande seção de ar, deve dirigir esse ar de modo a "varrer" toda a superfície da carcaça, onde se dá a troca de calor. De nada adianta um grande volume de ar se ele se espalha sem retirar o calor do motor.
b) A área total de dissipação deve ser a maior possível. Entretanto, um motor com uma carcaça muito grande, para obter maior área, será muito caro e pesado, além de ocupar muito espaço. Por isso, a área de dissipação disponível é limitada pela necessidade de fabricar motores pequenos e leves. Isso é compensado em parte, aumentando-se a área disponível por meio de aletas de resfriamento, fundidas com a carcaça (no caso da linha "H") ou por meio de um dispositivo de resfriamento, tais como: trocadores de calor (ar-ar ou ar-água), dutos para direcionar o fluxo de ar, ventilação independente, etc.
c) Um sistema de resfriamento eficiente é aquele que consegue dissipar a maior quantidade de calor disponível, através da menor área de dissipação. Para isso, é necessário que a queda interna de temperatura, mostrada na Figura 8.1, seja minimizada. Isto quer dizer que deve haver uma boa transferência de calor do interior do motor até a superfície externa.

O que realmente queremos limitar é a elevação de temperatura no enrolamento sobre a temperatura do ar ambiente. Esta diferença total (Δt) é comumente chamada de "elevação de temperatura" do motor e, como é indicado na Figura 8.1 vale a soma da queda interna com a queda externa.

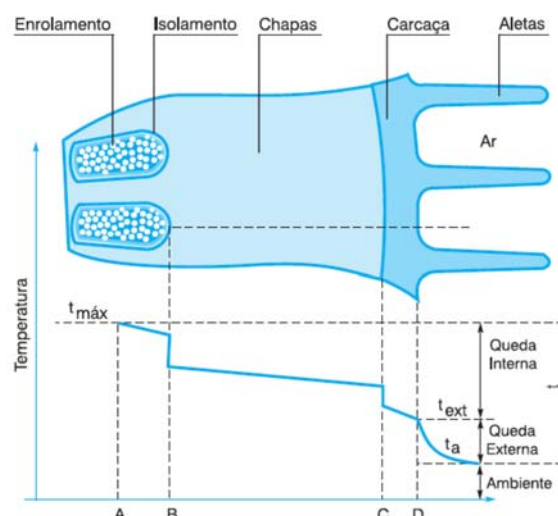



Figura 8.1: Comportamento da temperatura.

Como vimos, interessa reduzir a queda interna (melhorar a transferência de calor) para poder ter uma queda externa a maior possível, pois esta é que realmente ajuda a dissipar o calor. A queda interna de temperatura depende de diversos fatores como mostra a Figura 8.1. A relação com a temperatura dos pontos representados na figura acima, são explicados a seguir:

A Ponto mais quente do enrolamento, no interior da ranhura, onde é gerado o calor proveniente das perdas nos condutores;
AB Queda de temperatura na transferência de calor do ponto mais quente (interior da bobina) até a parte externa da bobina. Como o ar é um péssimo condutor de calor, é importante que não haja "vazios" no interior da ranhura, isto é, as bobinas devem ser compactas e a impregnação pelo sistema V.P.I. deve ser perfeita;
B Queda através do isolamento da ranhura e no contato deste com os condutores de um lado, e com as chapas do núcleo, do outro. O emprego de materiais modernos melhora a transmissão de calor através do isolante; a perfeita impregnação, melhora o contato do lado interno, eliminando os espaços vazios; o bom alinhamento das chapas estampadas, melhora o contato do lado externo, eliminando camadas de ar que prejudicam a transferência de calor;
BC Queda de temperatura por transmissão através do material das chapas do núcleo;
C Queda no contato entre o núcleo e a carcaça. A condução de calor será tanto melhor quanto mais perfeito for o contato entre as partes, dependendo do bom alinhamento das chapas, e precisão de usinagem da carcaça. Superfícies irregulares deixam espaços vazios entre elas, resultando mau contato e, portanto, má condução do calor e elevada queda de temperatura neste ponto;
CD Queda de temperatura por transmissão através da espessura da carcaça.

Graças a um projeto moderno, uso de materiais avançados, processos de fabricação aprimorados, sob um permanente controle de qualidade, os motores WEG

apresentam uma excelente transferência de calor do interior para a superfície, eliminando assim os "pontos quentes" no enrolamento.

Temperatura externa do motor:
Era comum, antigamente, verificar o aquecimento do motor, medindo, com a mão, a temperatura externa da carcaça. Em motores modernos, este método primitivo é completamente errado. Como vimos anteriormente, os critérios modernos de projeto, procuram aprimorar a transmissão de calor internamente, de modo que a temperatura do enrolamento fique pouco acima da temperatura externa da carcaça, onde ela realmente contribui para dissipar as perdas. Em resumo, a temperatura da carcaça não dá indicação do aquecimento interno do motor, nem de sua qualidade. Um motor frio por fora pode ter perdas maiores e temperatura mais alta no enrolamento do que um motor exteriormente quente.

8.1.2 Vida Útil do Motor de Indução

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, se não considerarmos as peças que se desgastam devido ao uso, como escovas e rolamentos, a sua vida útil depende quase que exclusivamente da vida útil do material isolante.
Este é afetado por muitos fatores, como temperatura, umidade do ar, vibrações, esforços mecânicos, ambientes corrosivos e outros. Dentre os fatores determinantes da vida útil do isolante, um dos mais importantes é a temperatura de trabalho.
Quando falamos em diminuição da vida útil do motor, não nos referimos às temperaturas elevadas, nas quais o isolante se “queima” e o enrolamento é destruído de repente. Vida útil da isolação é considerada na temperatura de trabalho, sendo esta menor que a temperatura de queima do material isolante. Refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza o curto-circuito.
A experiência mostra que a isolação tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura e demais condições forem mantidas dentro de certos limites, caso contrário a vida útil da isolação vai se tornando cada vez mais curta. A limitação de temperatura se refere ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente ao enrolamento todo. Basta um ponto fraco no interior da bobina para que o enrolamento fique inutilizado.
Das curvas de variação das características dos materiais em dependência da temperatura determina-se a sua vida útil, que é reduzida pela metade a cada 8 a 10 graus de operação acima da temperatura nominal da classe. Esta afirmação é válida se considerarmos que a temperatura de trabalho é praticamente constante por grandes períodos, e que se os outros fatores tiverem na sua condição ótima.
Outros fatores combinados entre si e com a temperatura são fatores importantes e determinantes da vida útil, são eles:

- Grande variação da temperatura do enrolamento e com frequência durante as condições normais de trabalho (Ex: Parte do dia o motor está ligado e outra parte desligado)
- Frequência das partidas. Durante a partida, principalmente a direta na rede, há um grande esforço mecânico nas bobinas provocado pela corrente elevada que circula no cobre. Esse esforço tende a curvar a cabeça de bobina na direção do rotor provocando micro fissuras no isolante.
- Acionamento por Inversor de Frequência. Esse acionamento fornece ao motor ondas de tensão com alta frequência e com grande velocidade de variação da tensão. Quanto maior o dV/dT maior é a solicitação do isolamento.
- Surto de manobra (liga/desliga) ou de origem atmosférica. Na operação de ligar ou desligar é gerado um transitório de tensão em cima do enrolamento do motor, este com amplitude bem maior do que a tensão nominal. Quando há a incidência de um raio na rede elétrica e este chega ao motor, este pico de tensão tende a castigar o isolante.
- Condições do ambiente do local da instalação. Ambientes agressivos agem diretamente sobre o material isolante das bobinas.
- Nível de vibração do motor.
- Condições da manutenção geral no motor.
- Demais condições de operação.

8.1.3 Classes de Isolamento

Definição das classes:
Como foi visto acima, o limite de temperatura depende do tipo de material empregado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais) são agrupados em *CLASSES DE ISOLAMENTO*, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada sua vida útil.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme NBR-17094, são as seguintes:

- Classe A (105°C)
- Classe E (120°C)
- Classe B (130°C)
- Classe F (155°C)
- Classe H (180°C)

A classes F é a comumente utilizada em motores de alta tensão. A Tabela 8.1, mostra os limites de temperatura recomendados por diversas normas internacionais e entidades classificadoras.

Tabela 8.1: Limites de elevação de temperatura por classe de isolamento.

NORMA	Máxima Temperatura Ambiente (°C)	Máxima Sobre-elevação de Temperatura Permitida por Classe de Isolamento, Δt em K (Método de Variação de Resistência)		
		B	F	H
Brasil: ABNT NBR-17094	40	80	105	125
Norma Internacional: IEC 60034-1	40	80	105	125
Alemanha: VDE 0530 Parte 1	40	80	105	125
USA: NEMA MG-1 e ANSI	40	80	105	125
Canadá: CSA C22.2 No.100	40	80	105	125
Grã-Bretanha: BS 2613	40	80	105	125
Austrália: AS 1359.32	40	80	105	125
Bélgica: NBN 7	40	80	105	125
Dinamarca: DS 5002	40	80	105	125
França: NF CS1-112	40	80	105	125
Holanda: VEMET N 1007	40	80	105	125
Índia: IS: 325- 1961	40	80	--	125
Itália: CEI 2 – 3	40	80	105	125
Noruega: NEK	40	80	105	125
Áustria: OVE – MIO	40	80	105	125
Suécia: SEN 260101	40	80	105	125
Suíça: SEV 3009	40	80	105	125
Germanischr Lloyd (1)	45	75	90	125
American Bureau of Shipping (1)	50	70	95	125
Bureau Veritas (1)	45	70	100	125
Norske Veritas (1)	45	70	90	125
Lloyds Register (1)	45	70	90	125
Registro Italiano Navale (1)	45	70	90	125
Korean Register (1)	50	70	90	125
China Classification Society (1)	45	75	95	125

NOTA

(1) Utilização em área naval.

8.1.4 Medida da Elevação de Temperatura do Enrolamento

É muito difícil medir a temperatura do enrolamento com termômetros ou sensores de temperatura, pois a temperatura varia de um ponto a outro e nunca se sabe se o ponto da medição está próximo do ponto mais quente. O método mais usual de se medir a temperatura de um enrolamento durante os ensaios é através da variação de sua resistência ôhmica com a temperatura, que aproveita a propriedade dos condutores de variar sua resistência, segundo uma lei conhecida.

A elevação da temperatura pelo método da resistência, para condutores de cobre, é calculada por meio da seguinte fórmula:

$$D_t = t_2 - t_a = \left[\left(\frac{R_2 - R_1}{R_1}\right)\right] \cdot (235 + t_1) + (t_1 - t_a)$$

Onde: D_t = elevação de temperatura;
t_2 = temperatura dos enrolamentos no fim do ensaio;
t_a = temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio;
t_1 = temperatura do enrolamento antes do ensaio, praticamente igual a do meio refrigerante, medida por termômetro;
R_1 = resistência do enrolamento antes do ensaio;
R_2 = resistência do enrolamento no fim do ensaio.

Outro método bastante utilizado para medição da elevação de temperatura é através dos sensores tipo RTD's (por exemplo o Pt100). Este método é o mais utilizado para monitoramento da temperatura em motores operando em campo, pois não necessita desconectar o motor para realizar a medição da resistência dos enrolamentos.
O princípio de funcionamento é o mesmo, pois se tratam de resistências calibradas que variam linearmente de acordo a temperatura.
Este método detecta a temperatura no ponto mais quente do enrolamento, pois os sensores são instalados no centro do pacote de chapas do estator entre as duas camadas de bobinas da ranhura, enquanto o método da resistência do enrolamento considera a temperatura média do enrolamento.

8.1.5 Aplicação a Motores Elétricos

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe. A temperatura total vale a soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura "Dt" mais a diferença que existe entre a temperatura média do enrolamento e a do ponto mais quente.
As normas de motores fixam a máxima elevação de temperatura "Dt", de modo que a temperatura do ponto mais quente fica limitada, baseada nas seguintes considerações:

a) A temperatura ambiente é, no máximo 40ºC, por norma, e acima disso as condições de trabalho são consideradas especiais;
b) A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente não varia muito de motor para motor e seu valor estabelecido em norma, baseado na prática é 5ºC, para as classes A e E, 10ºC para as classes B e F e 15ºC para a classe H.

As normas de motores, portanto, estabelecem um máximo para a temperatura ambiente e especificam uma elevação de temperatura máxima para cada classe de isolamento. Deste modo, fica indiretamente limitada a temperatura do ponto mais quente do motor. Os valores numéricos e a composição da temperatura admissível do ponto mais quente são indicados na Tabela 8.2:

Tabela 8.2: Composição da temperatura em função da classe de isolamento.

Classe de Isolamento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
Δt = elevação de temperatura (método da resistência)	°K	60	75	80	105	125
Diferença entre a temperatura do ponto mais quente e a temperatura média	°K	5	5	10	10	15
Total: temperatura do ponto mais quente	°K	105	120	130	155	180

8.2 REGIME DE SERVIÇO

É o grau de regularidade da carga a que o motor é submetido. Os motores normais são projetados para regime contínuo, isto é, a carga é constante por tempo indefinido e igual a potência nominal do motor. A indicação do regime do motor deve ser feita pelo comprador, da forma mais exata possível.
Nos casos em que a carga não varia ou nos quais varia de forma previsível, o regime poderá ser indicado numericamente ou por meio de gráficos que representam a variação em função do tempo das grandezas variáveis. Quando a sequência real dos valores no tempo for indeterminada, deverá ser indicada uma sequência fictícia não menos severa que a real.

8.2.1 Regimes Padronizados

Os tipos de regimes os símbolos alfa-numéricos a eles atribuídos, são indicados a seguir:

a) Regime contínuo (S1)
Funcionamento a carga constante de duração suficiente para que se alcance o equilíbrio térmico.
t_N = funcionamento em carga constante;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida.

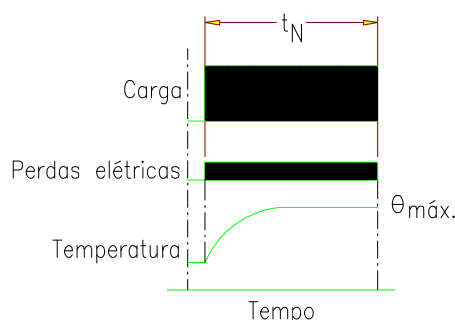



Figura 8.2: Regime contínuo (S1).

Exemplos: Moinhos, britadores, bombas, compressores, esteira transportadoras. Todas as cargas que permanecem com rotação constante e sem grande variação de carga após a partida.

b) Regime de tempo limitado (S2)
Funcionamento a carga constante, durante um certo tempo, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido de um período de repouso de duração suficiente para restabelecer a igualdade de temperatura com o meio refrigerante.

t_N = funcionamento em carga constante;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida.

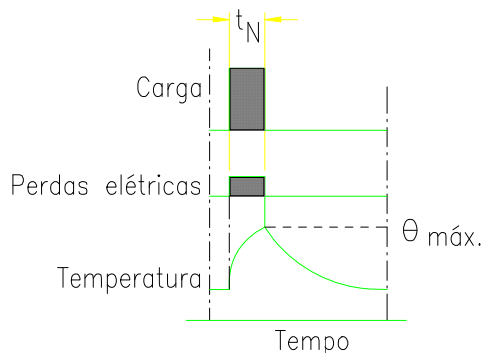



Figura 8.3: Regime S2

Exemplos: Motores de emergência, Unidades Hidráulicas, Bombas de incêndio.

c) Regime intermitente periódico (S3)
Sequência de ciclos idênticos, cada qual incluindo um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico durante um ciclo de regime e no qual a corrente de partida não afete de modo significativo a elevação de temperatura.

t_N = funcionamento em carga constante;
t_R = repouso;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida;
ED= fator de duração do ciclo.

$$ED = \frac{t_N}{t_N + t_R} \,.100\%$$

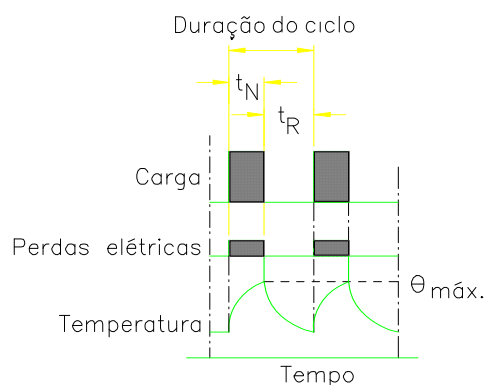



Figura 8.4: Regime S3.

Exemplos: Compressores, bombas...

d) Regime intermitente periódico com partidas (S4)
Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos, para que se atinja o equilíbrio térmico.

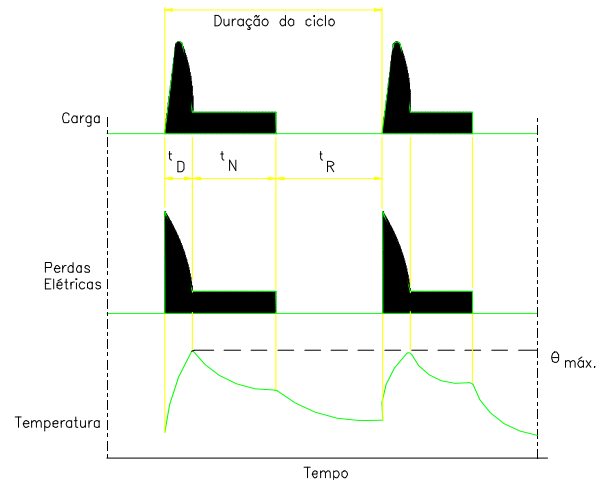



Figura 8.5: Regime S4.

t_N = funcionamento em carga constante;
t_R= repouso;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida; t_D= partida;
ED = fator de duração do ciclo.

$$ED = \frac{t_N + t_D}{t_N + t_D + t_R} \,.100\%$$

e) Regime intermitente periódico com frenagem elétrica (S5)
Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico.

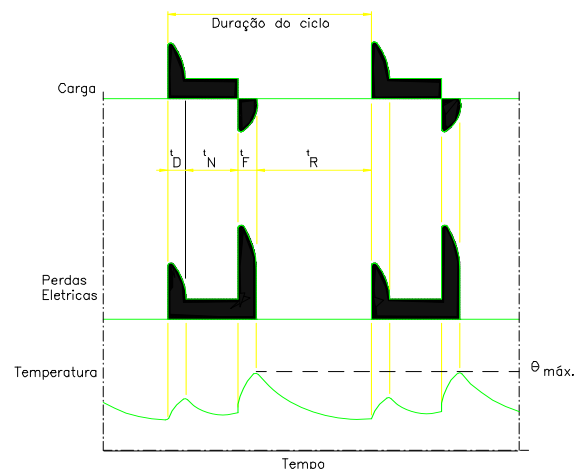



Figura 8.6: Regime S5.

t_N = funcionamento em carga constante; t_R= repouso;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida; t_F= frenagem elétrica;
ED = fator de duração do ciclo; t_D= partida;

$$ED=\frac{t_N+t_D+t_F}{t_N+t_D+t_F+t_R}.100\%$$

Regimes de serviço S4 e S5: Exemplo: Ponte rolante, guindastes, hilos

f) Regime de funcionamento contínuo com carga intermitente (S6)
Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de funcionamento a carga constante e de um período de funcionamento em vazio, não existindo período de repouso.

t_N = funcionamento em carga constante;
t_V= repouso;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida;
ED= fator de duração do ciclo.

$$ED=\frac{t_N}{t_N+t_V}.100\%$$

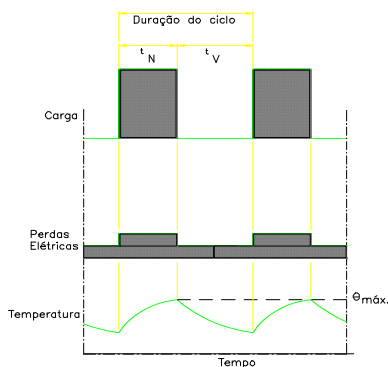



Figura 8.7: Regime S6.

Exemplos: Laminadores, Picadores, Misturadores, Centrífugas

g) Regime de funcionamento contínuo com frenagem elétrica (S7)
Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, de um período de funcionamento a carga constante e um período de frenagem elétrica, não existindo o período de repouso.

t_N = funcionamento em carga constante;
t_F = frenagem elétrica;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida;
t_D = partida;
ED = fator de duração do ciclo (100%).

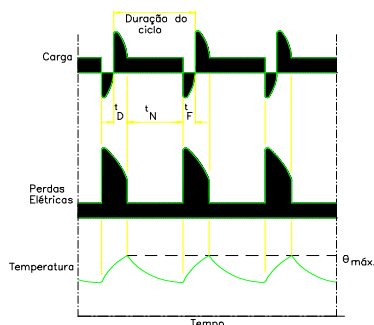



Figura 8.8: Regime S7.

Exemplos: Laminadores, Tesouras...

h) Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade (S8)
Sequência de ciclos de regimes idênticos, cada ciclo consistindo de um período de partida e um período de funcionamento a carga constante, correspondendo a uma velocidade de rotação pré-determinada, seguidos de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes rotações. Não existe período de repouso.

t_{f1} e t_{f2} = frenagem elétrica;
t_d = partida;
t_{n1}, t_{n2} e t_{n3} = funcionamento em carga constante;
$\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida;
ED = fator de duração do ciclo.

$$ED=\frac{t_d+t_n1}{t_d+t_n1+t_f1+t_n2+t_f2+t_n3}.100\%$$

$$ED=\frac{t_d+t_n2}{t_d+t_n1+t_f1+t_n2+t_f2+t_n3}.100\%$$

$$ED=\frac{t_d+t_n3}{t_d+t_n1+t_f1+t_n2+t_f2+t_n3}.100\%$$

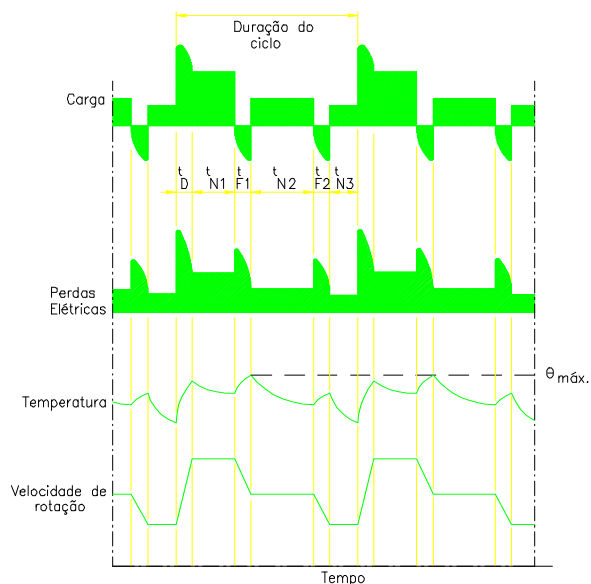



Figura 8.9: Regime S8.

NOTA
Nos regimes S3 e S8, o período é geralmente curto demais para que seja atingido o equilíbrio térmico, de modo que o motor vai se aquecendo e resfriando parcialmente a cada ciclo. Depois de um grande número de ciclos o motor atinge uma faixa de elevação de temperatura e equilíbrio.

i) Regimes especiais
Onde a carga pode variar durante os períodos de funcionamento, existe reversão ou frenagem por contracorrente, etc., a escolha do motor adequado, deve ser feita mediante consulta à fábrica e depende de uma descrição completa do ciclo:

- Potência necessária para acionar a carga ou, se ela varia conforme um gráfico de potência requerida durante um ciclo (a Figura 8.10 mostra um gráfico simples, onde a potência varia no período de carga);
- Conjugado resistente da carga;
- Momento de inércia total (GD2/4 ou J) da máquina acionada, referida à sua rotação nominal, ou à rotação do motor acionante;
- Número de partidas, reversões, frenagens por contracorrente, etc.;
- Duração dos períodos em carga e em repouso ou vazio.

Regimes S8 e S9: Exemplos de carga: Laminadores, bobinadeiras, desbobinadeiras.

8.2.2 Designação do Regime de Serviço

Para alguns regimes de serviço, é importante informar alguns dados relevantes para o dimensionamento do motor, como tempo de duração do ciclo, o fator de duração do ciclo e até mesmo o número de ciclos por período. Um dos exemplos de designação do regime de serviço:
S2 30 minutos: neste caso, a designação 30 minutos indica que o motor opera em carga durante 30 minutos, posteriormente permanece desligado o tempo suficiente para retornar à temperatura ambiente.
A designação dos regimes S2 a S8 é seguida das seguintes indicações:

a) S2, do tempo de funcionamento em carga constante;
b) S3 a S6, do fator de duração do ciclo;
c) S8, de cada uma das velocidades nominais que constituem o ciclo, seguida da respectiva potência nominal e do seu respectivo tempo de duração.

No caso dos regimes S4, S5, S7 e S8, outras indicações a serem acrescidas à designação, deverão ser estipuladas mediante acordo entre fabricante e comprador.

NOTA

Como exemplo das indicações a serem acrescidas, mediante o referido acordo às designações de regimes tipo diferentes do contínuo, citam-se as seguintes, aplicáveis segundo o regime tipo considerado:

a) Número de partidas por hora;
b) Número de frenagens por hora;
c) Tipo de frenagens;
d) Constante de energia cinética (H), na velocidade nominal, do motor e da carga, esta última podendo ser substituída pelo fator de inércia (FI).

NOTA

Constante de energia cinética é a relação entre a energia cinética (armazenada no rotor à velocidade de rotação nominal) e a potência aparente nominal. Fator de inércia é a relação entre a soma do momento de inércia total da carga (referido ao eixo do motor) e do momento de inércia do rotor.

8.2.3 Potência Nominal

É a potência que o motor pode fornecer, dentro de suas características nominais, em regime contínuo. O conceito de potência nominal, ou seja, a potência que o motor pode fornecer, está intimamente ligado à elevação de temperatura do enrolamento. Sabemos que o motor pode acionar cargas de potências bem acima de sua potência nominal, até quase atingir o conjugado máximo. O que acontece, porém é que, se esta sobrecarga for excessiva, isto é, for exigida do motor uma potência muito acima daquela para a qual foi projetado, o aquecimento normal será ultrapassado e a vida do motor será diminuída, podendo ele, até mesmo, queimar-se rapidamente.
Deve-se sempre ter em mente que a potência solicitada ao motor é definida pelas características da carga, isto é, independentemente da potência do motor, ou seja: para uma carga de 800cv solicitada de um motor, por exemplo, independentemente deste (o motor) ser de 600cv ou 1000cv, a potência solicitada ao motor será de 800cv.

8.2.4 Potência Equivalente

Evidentemente um motor elétrico deverá suprir à máquina acionada a potência necessária, sendo recomendável que haja uma margem de folga (entre 5 e 10%), pois pequenas sobrecargas poderão ocorrer; ou ainda, dependendo do regime de serviço, o motor pode eventualmente suprir mais ou menos potência. Apesar das inúmeras formas normalizadas de descrição das condições de funcionamento de um motor, é frequentemente necessário na prática, avaliar a solicitação imposta ao motor por um regime mais complexo que aqueles descritos nas normas. Uma forma usual é calcular a potência equivalente pela fórmula:

$$P_m^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t)^2 \; . \, dt$$

Onde: Pm = potência equivalente solicitada ao motor;
$P(t)$ = potência, variável com o tempo, solicitada ao motor;
T = duração total do ciclo (período).

O método é baseado na hipótese de que a carga efetivamente aplicada ao motor acarretará a mesma solicitação térmica que uma carga fictícia, equivalente, que solicita continuamente a potência Pm. Baseia-se também no fato de ser assumida uma variação das perdas com o quadrado da carga, e que a elevação de temperatura é diretamente proporcional às perdas. Isto é verdadeiro para motores que giram continuamente, mas são solicitados intermitentemente. Assim,

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}}$$

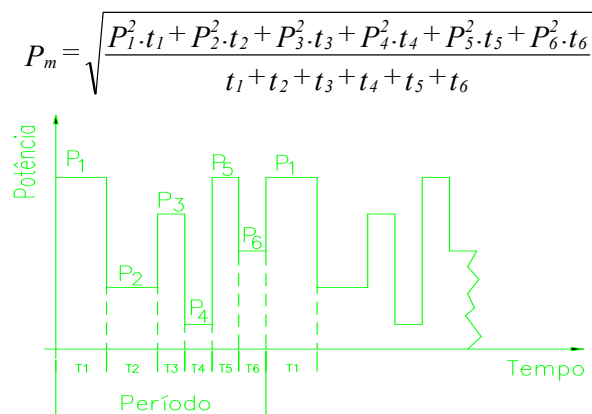



Figura 8.10: Funcionamento contínuo com solicitações intermitentes.

No caso do motor ficar em repouso entre os tempos de carga, a refrigeração deste será prejudicada. Assim, para os motores onde a ventilação está vinculada ao funcionamento do motor (por exemplo, motores totalmente fechados com ventilador externo montados no próprio eixo do motor) a potência equivalente é calculada pela fórmula:

$$P_m^2 = \frac{\Sigma(P_i^2 \cdot t_i)}{\Sigma(t_i + \frac{1}{3} t_r)}$$

Onde: Pi = cargas correspondentes;
ti = tempos em carga;
tr = tempos em repouso.

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_3^2 \cdot t_3 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_3 + t_5 + t_6 + \frac{1}{3}(t_2 + t_4 + t_7)}}$$

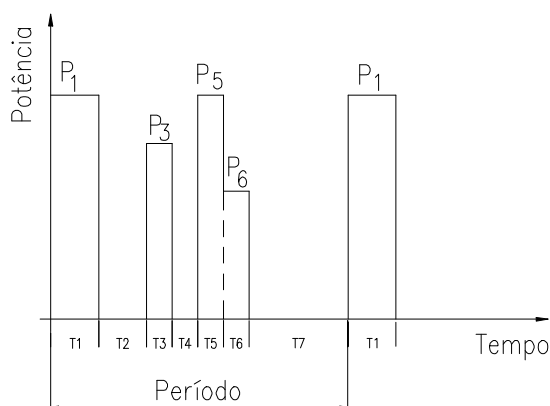



Figura 8.11: Funcionamento com carga variável e com repouso entre os tempos de carga

8.3 FATOR DE SERVIÇO (FS)

Chama-se fator de serviço (FS) o fator que, aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob condições especificadas. Note que se trata de uma capacidade de sobrecarga contínua, ou seja, uma reserva de potência que dá ao motor uma capacidade de suportar melhor o funcionamento em condições desfavoráveis. Entretanto, no fator de serviço as normas permitem que exista um acréscimo de 10ºC na elevação de temperatura da classe.

O fator de serviço não deve ser confundido com a capacidade de sobrecarga momentânea, durante um curto período de tempo. Os motores WEG podem suportar sobrecargas até 60% da carga nominal, durante 15 segundos. O fator de serviço FS=1.0, significa que o motor não foi projetado para funcionar continuamente acima de sua potência nominal nas condições nominais de operação. Isto, entretanto, não muda a sua capacidade para sobrecargas momentâneas.

Em aplicações onde são exigidas uma capacidade de sobrecarga, recomenda-se a utilização de um motor com potência nominal superior a normalizada, para evitar que a elevação de temperatura para a classificação térmica utilizada seja excedida e para fornecer o conjugado adequado. A utilização do fator de serviço implica uma vida útil inferior àquela do motor com carga nominal.

Os motores WEG são aptos a operarem no fator de serviço FS=1.15 com elevação de temperatura de 105°C.

8.4 VELOCIDADE NOMINAL

É a velocidade (rpm) do motor funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. Conforme visto no capítulo 2, item 2.4.3, este depende do escorregamento e da velocidade síncrona.

$$n = n_s \cdot \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) \quad \text{[rpm]}$$

A velocidade síncrona ns é função do número de polos e da frequência de alimentação:

$$n_s = \frac{60.f}{p} = \frac{120.f}{2p} \quad \text{[rpm]}$$

8.5 CORRENTE NOMINAL (A)

É a corrente que o motor absorve da rede quando funciona à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. O valor da corrente nominal depende do rendimento (η) e do fator de potência (cosφ) do motor:

$$I = \frac{P(kW).1000}{\sqrt{3}.V.\eta.\cos\varphi} = \frac{P(cv).736}{\sqrt{3}.V.\eta.\cos\varphi}$$

Os valores típicos de corrente, rendimento e fator de potência, são mostrados nos catálogos.

8.6 RENDIMENTO

O rendimento depende do projeto e do tipo do motor, sendo representado pela a razão da potência útil no eixo pela potência absorvida da rede. A diferença entre estas duas grandezas são as perdas elétricas e mecânicas do motor.

Há dois métodos principais para determinação do rendimento: o direto e o através de circuito equivalente (Métodos 05 e 07 da NBR 5383).

NOTA

Os dois métodos citados consideram valores assumidos de perdas suplementares em 0,5% da potência nominal.

8.6.1 Importância do Rendimento

É importante que o motor tenha um rendimento alto, por dois motivos. Primeiro, porque um rendimento alto significa perdas baixas e, portanto, um menor aquecimento do motor. Segundo, porque, quanto maior o rendimento, menor a potência absorvida da rede, e portanto, menor o custo da energia elétrica paga.
O rendimento varia com a carga solicitada do motor. Os catálogos dos motores Weg, indicam os valores típicos do rendimento em função da carga (50%, 75% e 100% de carga). Estes valores são representados genericamente na Figura 8.12:

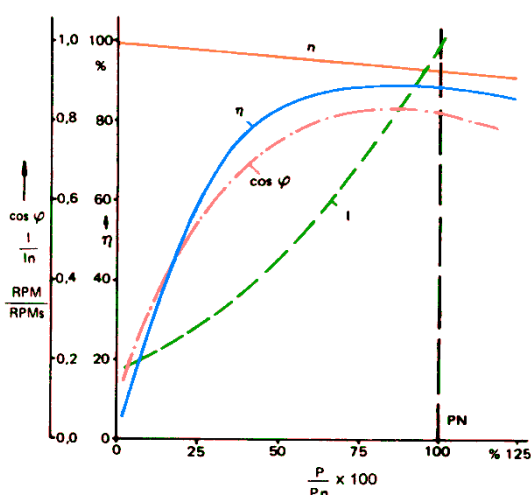



Figura 8.12: Curvas características típicas de desempenho de motores de indução trifásicos

8.7 FATOR DE POTÊNCIA

Um motor não consome apenas potência ativa, depois convertida em trabalho mecânico, mas também potência reativa necessária para magnetização da chapa, que não produz trabalho. No diagrama da Figura 8.13, o vetor P representa a potência ativa e o Q a potência reativa, que somadas resultam na potência aparente S. A relação entre a potência ativa, medida em kW e a potência aparente medida em kVA, chama-se fator de potência.

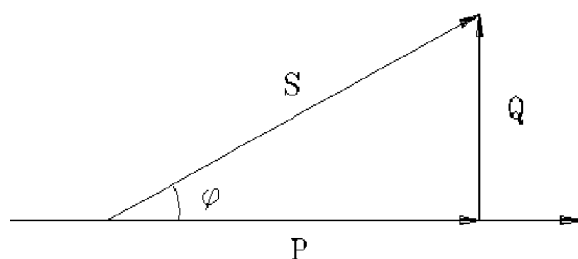



Figura 8.13: Triângulo de potências.

$$S=\sqrt{3}.V.I \quad [VA]$$

$$P=\sqrt{3}.V.I.\cos\varphi \quad [W]$$

$$Q=\sqrt{3}.V.I.sen\varphi \quad [VAr]$$

As normas internacionais admitem tolerância para baixo do fator de potência ofertado para o valor obtido em ensaio.

8.7.1 Importância do Fator de Potência

Visando otimizar o aproveitamento do sistema elétrico brasileiro, reduzindo o trânsito de energia reativa nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, a norma vigente, determina como referência para o fator de potência das cargas 0,92.
O aumento do fator de potência dá maior disponibilidade de potência ativa no sistema, já que a energia reativa limita a capacidade de transporte de energia útil.
O motor elétrico é uma peça fundamental, pois dentro das indústrias, representa mais de 60% do consumo de energia. Logo, é imprescindível a utilização de motores com potência e características bem adequadas à sua função. O fator de potência varia com carga imposta ao motor. Os catálogos Weg indicam os valores típicos desta variação que são também representados na Figura 8.12.

8.7.2 Correção do Fator de Potência

Existem dois meios para elevar o fator de potência do motor, utilizando bancos de capacitores (mais usado) ou modificando o projeto do motor elétrico. Este último método não é muito utilizado, pois eleva muito o preço do motor, o retorno de investimento não é satisfatório. O aumento do fator de potência é realizado em geral, com a ligação de uma carga capacitiva, normalmente um capacitor ou motor síncrono sobre excitado em paralelo com a carga.

Exemplo 1 – Resolução Gráfica:
Um motor elétrico, trifásico de 1000cv (736kW), operando com 100% da potência nominal, com fator de potência original de 0,86 e um rendimento de 96%. O fator de potência desejado é de 0,95. Qual é o valor do banco de capacitores necessário para corrigir o fator de potência do motor?

Solução:PM = 736kW $\therefore$

$$P_{consumida} = \frac{P}{\eta} = \frac{736}{0,96} = 766.67kW$$

$$\varphi_1 = \text{arccos}\, 0,86 = 30,7° \qquad \varphi_2 = \text{arccos}\, 0,95 = 18,2°$$

$$Q_1 = P_{cons} \cdot \tan\ \varphi_1 \qquad Q_2 = P_{cons} \cdot \tan\ \varphi_2$$

$$kVAR_{necessario} = Q_1 - Q_2$$

$$Q_1 - Q_2 = 0,594 \cdot P_{cons} - 0,329 \cdot P_{cons}$$

$$0,594 \cdot P_{cons} - 0,329 \cdot P_{cons} = 0,265 \,.\, P_{cons}$$

$$kVAR_{necessario} = 0,265 \,.\, 766,67k = 202,9kVAR$$

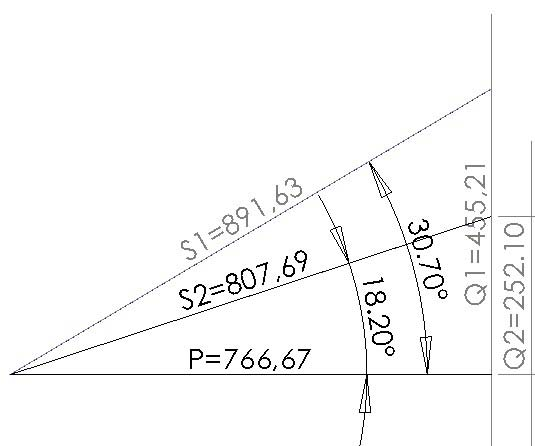



Figura 8.14: Triangulo de potência do Exemplo 1

Exemplo 2: Resolução por tabela de correção de fator de potência:
Um motor elétrico trifásico, com potência nominal de 100 cv, com rendimento nominal de 93,5%, é acionado a plena carga, e nesta situação possui fator de potência 0,87.
Calcule o valor do banco de capacitores necessário para corrigir o fator de potência para 0,95.

Solução:
Uma das formas de resolução deste problema é a utilização da tabela 8.3, onde com o fator de potência original e o fator de potência desejado, obtém-se um fator multiplicativo.
Desta forma, obtém-se o valor do banco de capacitores através da seguinte equação:

$$kVAr = \left(\frac{P(cv)\,.\,0{,}736 \cdot F\,.\,100\%}{n\%} \right)$$

Onde: $kVAr$ = potência trifásica do banco de capacitores a ser instalado
$P(cv)$ = potência nominal do motor
F = fator obtido na tabela 8.3
$n\%$ = rendimento nominal do motor

Desta forma:

$$kVAr = \left(\frac{100\,.\,0{,}736 \cdot 0{,}238\,.\,100}{93{,}5} \right) = 18{,}735 \text{ kVAr}$$

Tabela 8.3: Correção de Fator de Potência

FATOR DE POTÊNCIA ORIGINAL	FATOR DE POTÊNCIA DESEJADO																				
	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
0,50	0,982	1,008	1,034	1,060	1,086	1,112	1,139	1,165	1,192	1,220	1,248	1,276	1,306	1,337	1,369	1,403	1,442	1,481	1,529	1,590	1,732
0,51	0,937	0,962	0,989	1,015	1,041	1,067	1,094	1,120	1,147	1,175	1,203	1,231	1,261	1,292	1,324	1,358	1,395	1,436	1,484	1,544	1,687
0,52	0,893	0,919	0,945	0,971	0,997	1,023	1,060	1,076	1,103	1,131	1,159	1,187	1,217	1,248	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500	1,643
0,53	0,850	0,876	0,902	0,928	0,954	0,980	1,007	1,033	1,060	1,088	1,116	1,144	1,174	1,205	1,237	1,271	1,308	1,349	1,397	1,457	1,600
0,54	0,809	0,835	0,861	0,887	0,913	0,939	0,966	0,992	1,019	1,047	1,075	1,103	1,133	1,164	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416	1,359
0,55	0,769	0,795	0,821	0,847	0,873	0,899	0,926	0,952	0,979	1,007	1,035	1,063	1,090	1,124	1,456	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519
0,56	0,730	0,756	0,782	0,808	0,834	0,860	0,887	0,913	0,940	0,968	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480
0,57	0,692	0,718	0,744	0,770	0,796	0,882	0,849	0,875	0,902	0,930	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442
0,58	0,655	0,681	0,707	0,733	0,759	0,785	0,812	0,838	0,865	0,893	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405
0,59	0,618	0,644	0,670	0,696	0,722	0,748	0,775	0,801	0,828	0,856	0,884	0,912	0,943	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368
0,60	0,584	0,610	0,636	0,662	0,688	0,714	0,741	0,767	0,794	0,822	0,850	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334
0,61	0,549	0,575	0,601	0,627	0,653	0,679	0,706	0,732	0,759	0,787	0,815	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299
0,62	0,515	0,541	0,567	0,593	0,619	0,645	0,672	0,698	0,725	0,753	0,781	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265
0,63	0,483	0,509	0,535	0,561	0,587	0,613	0,640	0,666	0,693	0,721	0,749	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,000	1,091	1,233
0,64	0,450	0,476	0,502	0,528	0,554	0,580	0,607	0,633	0,660	0,688	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,066	1,200
0,65	0,419	0,445	0,471	0,497	0,523	0,549	0576	0,602	0,629	0,657	0,685	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,027	1,169
0,66	0,388	0,414	0,440	0,466	0,492	0,518	0,545	0,571	0,598	0,26	0,654	0,692	0,709	0,742	0,755	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138
0,67	0,358	0,384	0,410	0,436	0,462	0,488	0,515	0,541	0,568	0,596	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,906	0,966	1,108
0,68	0,329	0,355	0,381	0,407	0,433	0,459	0,486	0,512	0,539	0,567	0595	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079
0,69	0,299	0,325	0,351	0,377	0,403	0,429	0,456	0,482	0,509	0,537	0,565	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049
0,70	0,270	0,296	0,322	0,348	0,374	0,400	0,427	0,453	0,480	0,508	0,536	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020
0,71	0,242	0,268	0,294	0,320	0,346	0,372	0,399	0,425	0,452	0,480	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992
0,72	0,213	0,239	0,265	0,291	0,317	0,343	0,370	0,396	0,423	0,451	0,479	0,507	0,534	0,568	0,600	0,624	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963
0,73	0,186	0,212	0,238	0,264	0,290	0,316	0,343	0,369	0,396	0,424	0,452	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936
0,74	0,159	0,185	0,211	0,237	0,263	0,289	0,316	0,342	0,369	0,397	0,425	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909
0,75	0,132	0,158	0,184	0,210	0,236	0,262	0,289	0,315	0,342	0,370	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882
0,76	0,106	0,131	0,157	0,183	0,209	0,235	0,262	0,288	0,315	0,343	0,371	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855
0,77	0,079	0,106	0,131	0,157	0,183	0,209	0,236	0,262	0,289	0,317	0,345	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,686	0,829
0,78	0,053	0,079	0,105	0,131	0,157	0,183	0,210	0,236	0,263	0,291	0,319	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,562	0,594	0,661	0,803
0,79	0,026	0,062	0,078	0,104	0,130	0,153	0,183	0,209	0,236	0,264	0,292	0,320	0,347	0,381	0,403	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776
0,80	0,000	0,026	0,062	0,078	0,104	0,130	0,157	0,183	0,210	0,238	0,266	0,264	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750
0,81		0,000	0,026	0,062	0,078	0,104	0,131	0,157	0,184	0,212	0,240	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724
0,82			0,000	0,026	0,062	0,078	0,105	0,131	0,158	0,186	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,496	0,556	0,696
0,83				0,000	0,026	0,062	0,079	0,105	0,132	0,160	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,536	0,672
0,84					0,000	0,026	0,053	0,079	0,106	0,14	0,162	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645
0,85						0,000	0,027	0,053	0,080	0,108	0,136	0,164	0,194	0,225	0,257	0,191	0,229	0,369	0,417	0,476	0,620
0,86							0,000	0,026	0,053	0,081	0,109	0,137	0,167	0,198	0,230	0,265	0,301	0,343	0,390	0,451	0,593
0,87									0,027	0,055	0,082	0,111	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,425	0,567
0,88										0,028	0,056	0,084	0,114	0,145	0,177	0,211	0,248	0,290	0,337	0,398	0,540
0,89											0,028	0,056	0,086	0,117	0,149	0,183	0,220	0,262	0,309	0,370	0,512
0,90												0,028	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,342	0,484
0,91													0,030	0,061	0,093	0,127	0,164	0,206	0,253	0,314	0,456
0,92														0,031	0,063	0,097	0,134	0,176	0,223	0,284	0,426
0,93															0,032	0,068	0,103	0,145	0,192	0,253	0,395
0,94																0,034	0,071	0,113	0,160	0,221	0,363
0,95																	0,037	0,079	0,126	0,187	0,328
0,96																		0,042	0,089	0,149	0,292
0,97																			0,047	0,108	0,251
0,98																				0,061	0,203
0,99																					0,142

9 REFRIGERAÇÃO

As perdas são inevitáveis no motor e o calor gerado por elas deve ser dissipado, ou seja, transferido para o meio refrigerante do motor, usualmente, o ar ambiente. A maneira pela qual é feita a troca de calor entre as partes aquecidas do motor e o ar ambiente é que define o seu "***Sistema de Refrigeração***". A classificação dos métodos de resfriamento foi definida conforme a norma ABNT-NBR 5110 e/ou IEC-60034-6.
Existem basicamente dois tipos de circuitos de refrigeração em motores elétricos: os circuitos abertos e os circuitos fechados.
Circuito aberto se caracteriza pela passagem do meio refrigerante (ar ou líquido) proveniente do ambiente externo ou recinto não contaminado através ou sobre o motor retornando para o ambiente externo ou recinto não contaminado.
Circuito fechado se caracteriza pela circulação do meio refrigerante (ar ou líquido) em um circuito fechado dentro, através da máquina ou em um trocador de calor no qual calor é transferido da máquina para o meio refrigerante.
Os sistemas usuais de refrigeração são apresentados a seguir**.**

9.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

9.1.1 Ventilação Axial

- Motor totalmente fechado (Linha HGF)

IC 0411 (ventilador externo no próprio eixo do motor)
IC 0416 (ventilador externo com motor auxiliar)
TEFC (Totally Enclosed Fan Cooled)
Máquina totalmente fechada, resfriada por ventilador e carcaça aletada (externa e internamente). O motor apresenta grau de proteção IP55 ou superior. Possui um ventilador interno e canais axiais no pacote de chapas do rotor e da carcaça, como mostram a Figura 9.1 e Figura 9.2:

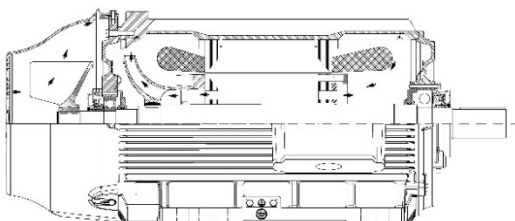



Figura 9.1: Motor totalmente fechado com ventilação externa.

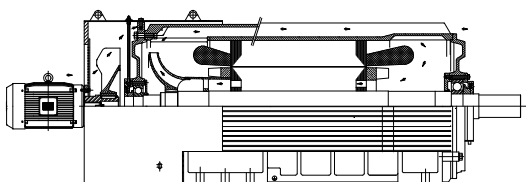



Figura 9.2: Motor totalmente fechado com ventilação externa independente.

- Motor refrigerado por Manto d’água (Linha WGM)

IC 071W (refrigerado por manto d’água e ventilador interno no próprio eixo do motor)
Máquina totalmente fechada, o calor é dissipado por convecção até a serpentina de água em volta do estator. O motor apresenta grau de proteção IP55 ou superior. Possui um ventilador interno, como mostram a Figura 9.3: Motor refrigerado por Manto d’água

Figura 9.3: Motor refrigerado por Manto d’água

9.1.2 Ventilação Mista

- Trocador de calor ar-ar (MGF, MAF)

IC 0611
TEAAC (Totally Enclosed Air-Air Cooled)
Este sistema de ventilação é utilizado em máquinas da linha Master, que possuem canais axiais e radiais de refrigeração em seus pacotes de chapas.
Este sistema de refrigeração é utilizado em motores de até 8 polos com tamanho até a carcaça 450.
O motor pode apresentar grau de proteção IP55 ou superior. Possui um ventilador interno e um externo acoplados ao eixo. O trocador de calor é montado na parte superior do motor.

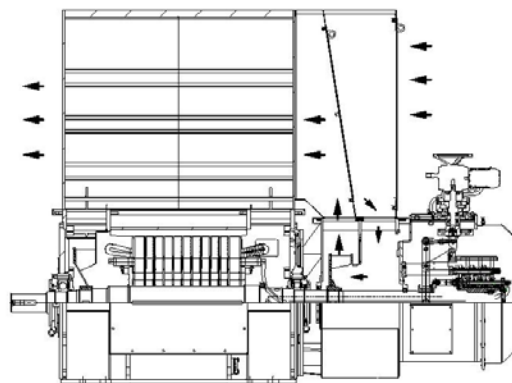



Figura 9.4: Motor totalmente fechado com trocador de calor ar-ar

- Aberto (AUTOVENTILADO) (MGA, MGP MAA, MAP)

IC 01
ODP (Open Dripproof) ou WP (Weather Protected type)
Neste sistema, o motor pode apresentar proteção IP23, IP24, IP23W (WPI) ou IP24W (WPII) caracterizando um motor aberto. Possui um ventilador interno acoplado ao eixo, o qual aspira o ar ambiente que passa através da máquina, fazendo assim a troca de calor.

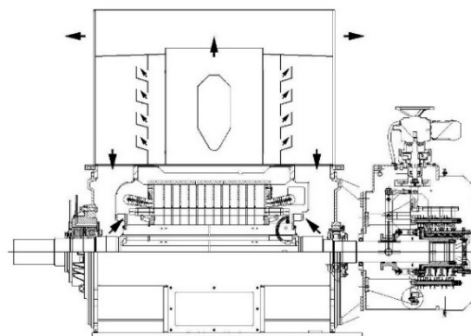



Figura 9.5: Motor aberto (MGP)

- Trocador de calor ar-água (MGW, MAW)

IC W 37A81
TEWAC (Totally Enclosed Water-Air Cooled)
O motor com trocador de calor ar-água pode apresentar grau de proteção IP55 ou superior, caracterizando um motor fechado. O motor possui um ventilador interno acoplado no eixo sendo que o ar é forçado a circular através do radiador de água efetuando assim a troca de calor.

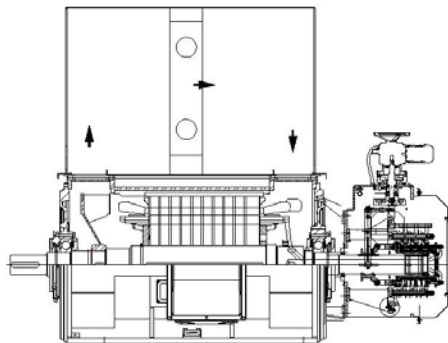



Figura 9.6: Motor com trocador de calor ar-água.

- Autoventilado por dutos (MGD, MAD)
  IC 33

Neste sistema, o motor apresenta um ventilador acoplado internamente no eixo, o qual aspira o ar de um recinto não contaminado que, após atravessar o motor, é devolvido ao meio ambiente. Grau de Proteção IP55 ou superior.

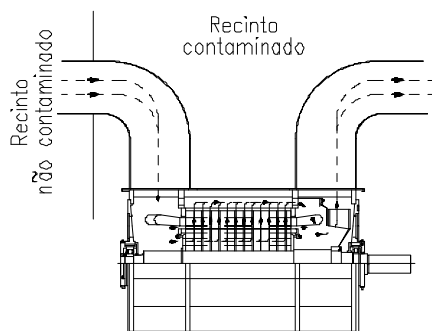



Figura 9.7: Motor autoventilado por dutos

- Ventilação independente com trocador de ar-ar (MGI, MAI)

IC 0666
Neste sistema existe um ventilador independente que força a circulação interna do ar. O outro ventilador independente aspira o ar ambiente e o faz circular através do trocador de calor ar-ar. O motor pode apresentar grau de proteção IP55 ou superior.

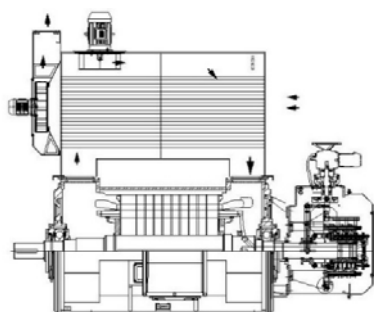



Figura 9.8: Motor com ventilação independente e trocador de calor ar-ar.

- Ventilação independente, motor aberto (MGV, MAV)

IC 06
O ar ambiente é forçado a circular através do motor por um ventilador independente acoplado no topo do motor, e em seguida, devolvido ao meio ambiente. Grau de Proteção IP23 ou IP24.

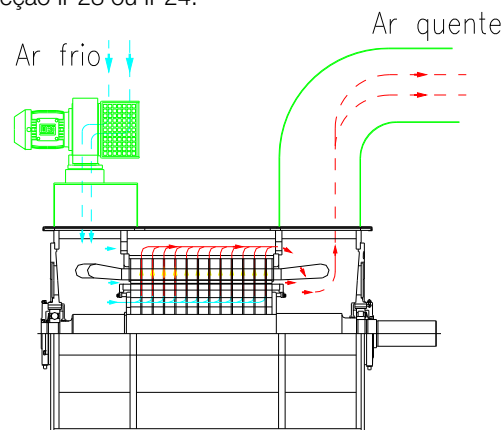



Figura 9.9: Motor aberto com ventilação independente.

- Ventilação independente com trocador de calor ar-água (MGL, MAL)

IC W 37A86
Neste sistema existe um ventilador independente que força a ventilação do ar internamente ao motor através do trocador de calor ar-água. Pode apresentar grau de proteção IP55 ou superior.

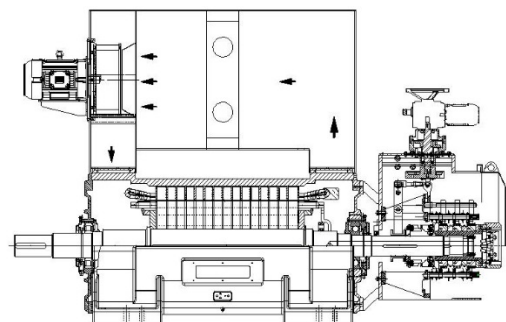



Figura 9.10: Motor com ventilação independente com trocador de calor ar-água.

- Ventilação independente por dutos (MGT, MAT)

IC 35
O ar é aspirado de um recinto não contaminado e canalizado através de dutos até o motor. Pode apresentar grau de proteção IP55 ou superior

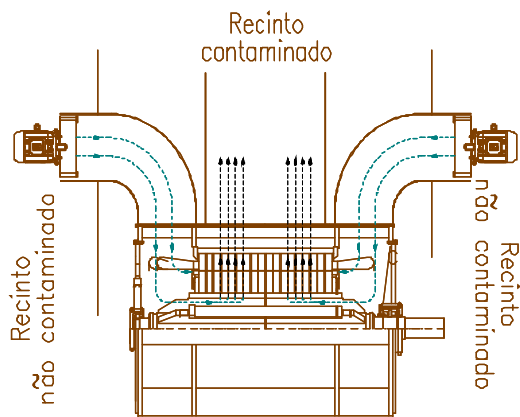



Figura 9.11: Motor com ventilação independente por dutos.

9.1.3 Ventilação Bilateral Simétrica

- Trocador de calor ar-ar (MGF, MAF)

IC 0611
TEAAC (Totally Enclosed Air-Air Cooled)
A ventilação Bilateral Simétrica é utilizada em motores da linha Master, que possuem canais radiais de ventilação nos pacotes de chapas do estator e do rotor.
Este tipo de ventilação é utilizado em máquinas na carcaça 500 ou maiores, em máquinas de 2 a 8 polos.
O motor pode apresentar grau de proteção IP55 ou superior. Possui ventiladores internos e externos acoplados ao eixo sendo que o ar quente é forçado a circular pelos tubos do trocador de calor ar-ar efetuando assim a troca térmica. O trocador de calor é montado na parte superior do motor.

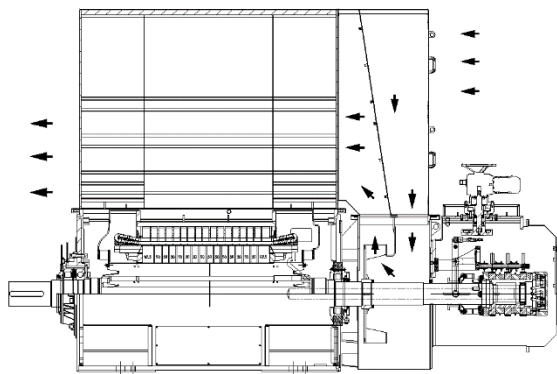



Figura 9.12: Motor totalmente fechado com trocador de calor ar-ar.

- Aberto (Autoventilado) (MGA, MGP, MAA e MAP)

IC 01
ODP (Open Dripproof) ou WP (Weather Protected type)
Neste sistema, o motor pode apresentar grau de proteção IP23, IP24, IP23W (WPI) ou IP24W (WPII) caracterizando um motor aberto. Possui dois ventiladores internos acoplados ao eixo, os quais aspiram o ar ambiente que passa através da máquina e caixa de ventilação, fazendo assim a troca de calor.

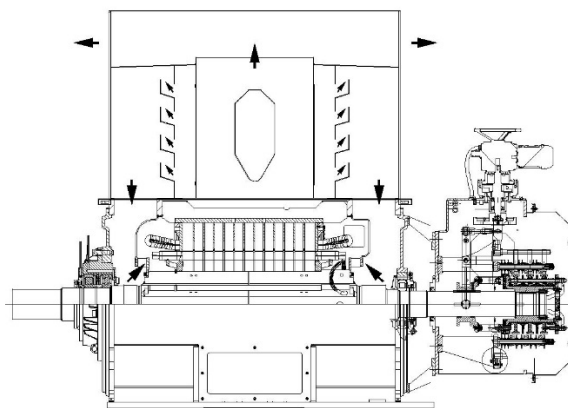



Figura 9.13: Motor aberto. (MAP)

- Trocador de calor ar-água (MGW, MAW)

IC W 37A81
TEWAC (Totally Enclosed Water-Air Cooled)
O motor com trocador de calor ar-água pode apresentar proteção IP55 ou superior, caracterizando um motor fechado. O motor possui dois ventiladores acoplados ao eixo.

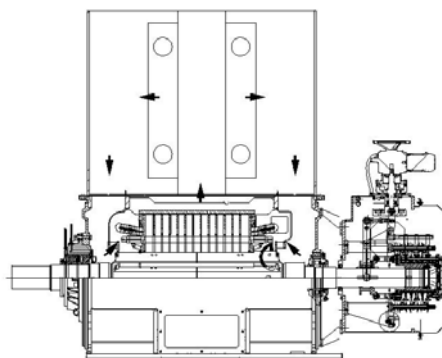



Figura 9.14: Motor com trocador de calor ar-água.

- Autoventilado por dutos (MGD, MAD)

IC 33
Neste sistema, o motor apresenta dois ventiladores acoplados internamente ao eixo, o qual aspira o ar de um recinto não contaminado que, após atravessar o motor, é devolvido ao meio ambiente. Grau de proteção IP55 ou superior.

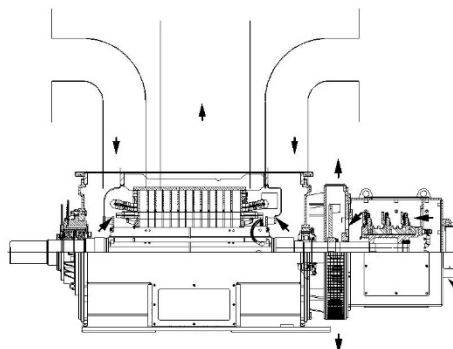



Figura 9.15: Motor autoventilado por dutos.

- Ventilação independente com trocador de ar-ar (MGI, MAI)

IC 0666

Neste sistema existe um ventilador independente que força a circulação interna do ar. O outro ventilador independente aspira o ar ambiente e o faz circular através do trocador de calor ar-ar.

Grau de proteção IP55 ou superior.

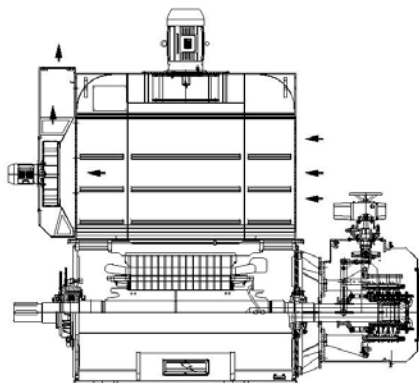



Figura 9.16: Motor com ventilação independente e trocador ar-ar

- Ventilação independente, motor aberto (MGV, MAV) IC 06

O ar ambiente é forçado a circular através do motor por dois ventiladores independentes acoplados no topo do motor, e em seguida, devolvido ao meio ambiente. Grau de proteção IP23 ou IP24.

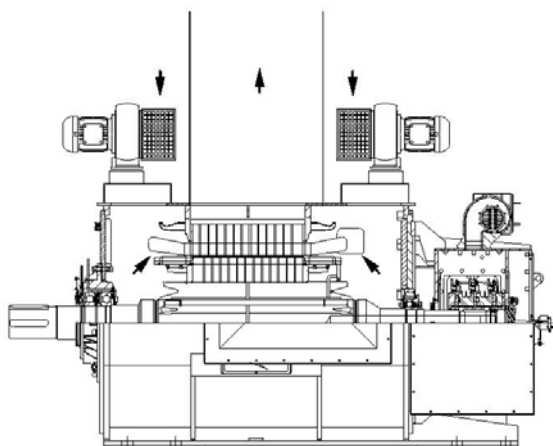



Figura 9.17: Motor aberto com ventilação independente.

- Ventilação independente com trocador de calor ar-água (MGL, MAL)

IC W 37A86

Neste sistema existe um ventilador independente que força a ventilação do ar internamente ao motor através do trocador de calor ar-água. Grau de proteção IP55 ou superior.

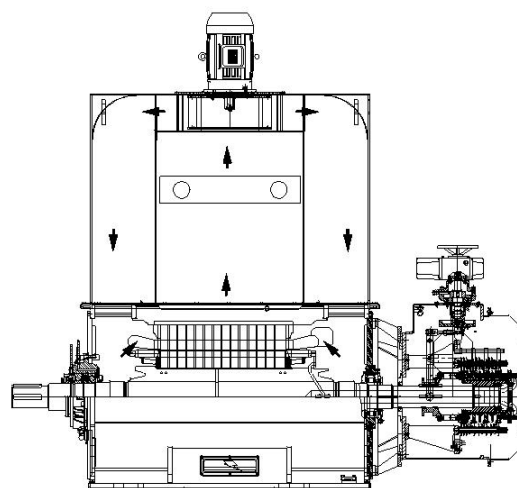



Figura 9.18: Motor com ventilação independente com trocador ar-água.

- Ventilação independente por dutos (MGT, MAT)

IC 35

O ar é aspirado (através de dois motoventiladores) de um recinto não contaminado e canalizado através de dutos até o motor. Grau de proteção IP55 ou superior.

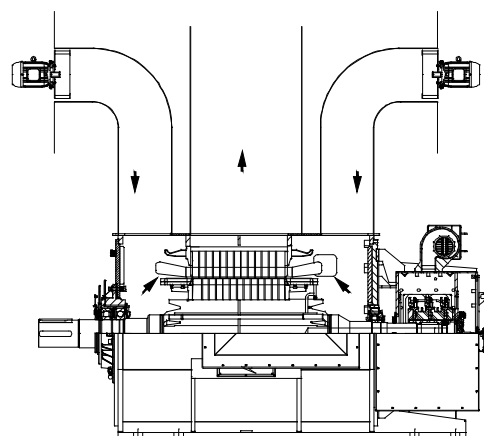



Figura 9.19: Motor com ventilação independente por dutos.

10 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Todos os motores elétricos têm em comum vários elementos construtivos. Adicionalmente, cada tipo de motor possui certos elementos específicos que o caracterizam.
Entre os elementos comuns a todos os tipos de motores estão as partes estruturais como: carcaça, estator, tampas, mancais, rotor, guias de ar, ventiladores externos e internos, trocador de calor, caixas de ligação principal e dos acessórios, flange, acessórios, entre outros.
Os materiais empregados para carcaça, caixas de ligação e de acessórios, flanges e ventiladores poderão ser de ferro fundido ou chapa de aço. Guias de ar, trocadores de calor, tampas defletoras são normalmente feitos de chapa de aço, alumínio ou fibra de vidro.
Embora as partes ativas (como pacotes de chapas do estator, do rotor e enrolamentos) possam ser consideradas substancialmente semelhantes nos diversos tipos de motores, significativas diferenças no número, arranjo e construção dos enrolamentos e nos núcleos ferro magnético produzem diferentes características de funcionamento.

10.1 CARCAÇAS

Sua função principal é apoiar e proteger o motor, alojando também o pacote de chapas e enrolamento do estator.
Podem ser construídas nos tipos horizontais ou verticais e com grau de proteção de acordo com as necessidades do ambiente. Sua fabricação pode ser em chapas de aço 1010/20 (Construção soldada) ou em ferro fundido.
A seguir temos cinco figuras que mostram as principais carcaças de motores de indução de alta tensão produzidas pela Weg Energia:

Figura 10.1: Linha "H", carcaça fundida.

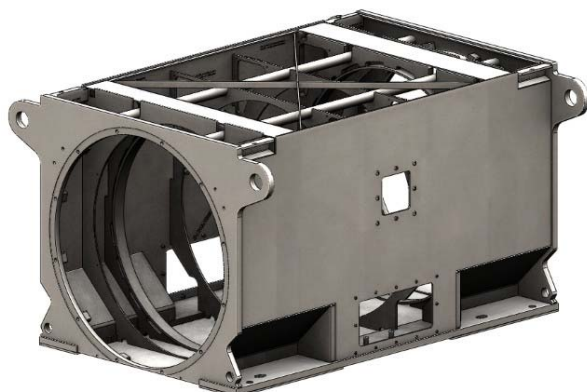



Figura 10.2: Linha "M", carcaça soldada.

Figura 10.3: Linha "M", carcaça fundida (aberta).

Figura 10.4: Linha "M", carcaça fundida (fechada).

Figura 10.5: Linha "W" carcaça soldada com espiral

a) Motores Linha "M":
Construída em ferro fundido nas carcaças IEC 280 a 500 e com chapas de aço 1010/20 para carcaça IEC 560 e acima.
Para as carcaças construídas em chapas as junções são feitas através de solda tipo "MIG", "MAG" ou "TIG", formando um conjunto sólido e robusto que se constitui a base estrutural da máquina. Todos os procedimentos de soldagem da WEG são conforme ASME Seção IX.
Todo o conjunto da carcaça recebe um tratamento de normalização para alívio de tensões provocadas pela solda.
Os motores são submetidos à jateamento da carcaça e pintura de fundo após tratamento térmico.

Figura 10.6: Motores da linha "M".

b) Motores Linha "H":
Carcaça formada por um bloco de ferro fundido FC 200 de alta resistência dotada de aletas externas e internas e canais de ventilação para o fluxo de ar, com o objetivo de proporcionar o máximo desempenho.
Apresenta como vantagem adicional o fato do material não ser suscetível a corrosão ativa.

Figura 10.7: Motor da linha "H".

10.2 TROCADOR DE CALOR

c) Trocador de Calor Ar-Ar:
Este sistema de arrefecimento é um dos mais difundidos dentre os sistemas de refrigeração de motores, sendo basicamente composto por:

- Tubos de alumínio sem costura com parede de 0,8mm ou especiais em tubos de aço ou cobre;
- Paredes e o corpo de trocador em chapas de aço 1010/20.

Todo o conjunto é protegido por tinta anti-corrosiva com especial atenção para os tubos que recebem um tratamento de fosfatização e pintura por imersão.

Figura 10.8: Trocador de calor ar-ar (princípio de troca térmica)

Figura 10.9: Trocador de calor ar-ar montado em cima do motor.

Figura 10.10: Trocador de calor ar-ar montado em volta do estator (MGR ou MAR)

a) Trocador de Calor Ar-Água:

- Trocadores de calor ar-água são constituídos de uma caixa de ventilação que possui por objetivo direcionar o fluxo de ar através das aletas do radiador, e um ou mais radiadores, que são construídos com tubos metálicos e aletas, que são conectados através dos cabeçotes e espelhos, que estão na estrutura lateral.
- A estrutura lateral é normalmente fabricada em aço carbono. As aletas normalmente são fabricadas em alumínio, sendo utilizado o cobre em ambientes marinizados ou corrosivos. Os cabeçotes, flanges e espelhos são de aço carbono e os tubos de cobre. No caso de utilização de água salgada, os tubos são feitos de liga cobre-níquel na proporção 90/10, e os espelhos, cabeçotes e flanges são protegidos com revestimento interno.
- Neste sistema o calor é absorvido pela água que circula no interior do radiador. Todo conjunto é protegido por tinta anti-corrosiva.

Figura 10.11: Trocador de calor ar-água (autoventilado)

O fluxo de ar interno do motor, através do trocador, é feito pelo ventilador montado no eixo do motor.

Figura 10.12: Trocador de calor ar-água (ventilação forçada)

O fluxo de ar interno do motor, através do trocador, é feito pelo ventilador montado no motor auxiliar do trocador (MGI ou MAI)

10.3 ESTATOR

O núcleo do estator é formado por chapas magnéticas de baixas perdas específicas (W/kg), ou aço-silício. As mesmas podem ter revestimento C4 ou especiais em C5.
Nas linhas "H" e “W” o estator recebe ventilação axial já que o estator está prensado na carcaça, o que facilita a dissipação do calor. Para estes motores, o calor é dissipado por convecção.
Na linha "M", para as carcaças 280 a 450 (inclusive) o pacote de chapas do estator recebe ventilação mista (axial e radial). Acima da carcaça 450, o estator é dimensionado com canais radias para receber a ventilação radial, devido à grande área interna, sendo este tipo de ventilação a mais eficiente.

Figura 10.13: Pacote de chapas do estator da linha H.

Figura 10.14: Pacote de chapas do estator da linha M.

10.4 BOBINAGEM

O sistema de isolamento WEG MICATHERM é baseado no processo "Global Vacuum Pressure Impregnation(GVPI)" desenvolvido em conjunto com os mais renomados fornecedores de materiais isolantes em todo o mundo. O processo GVPI por muitos anos tem mostrado sua eficiência e confiabilidade em máquinas elétricas girantes nas mais variadas aplicações. O sistema de isolamento é aplicado em máquinas de baixa, média e alta tensões que utilizam bobinas pré-formadas de 380 a 15.000V.
As bobinas são confeccionadas com fios de cobre retangulares que possuem quatro diferentes tipos de isolamento dependendo da aplicação:

1. Fios de cobre esmaltados;
2. Fios de cobre esmaltados recobertos com uma ou duas camadas de filamentos de vidro;
3. Fios de cobres nus recobertos com fita a base de mica;
4. Fios de cobre esmaltados recobertos com fita a base de mica.

1
2
3
4
Figura 10.15: Isolamentos dos fios de cobre

Após as bobinas serem expandidas (Figura 10.17), estas são isoladas com fita porosa à base de mica (Figura 10.18 e Figura 10.19), sendo que a espessura do isolamento depende da tensão nominal da máquina garantindo a rigidez dielétrica necessária e a tensão de aplicação da fita é determinada de forma a garantir a perfeita compactação do isolamento sobre a bobina.

A proteção contra efeito corona é garantida pela utilização de duas fitas, a condutora que evita as descargas provocadas na ranhura do estator e a semicondutora que é responsável pela equalização do gradiente de potencial no término do pacote do estator.
A fita condutora é aplicada em maquinas com tensão nominal acima de 5kV e consiste de falso tecido de poliéster ou tecido de vidro, dependendo da classe térmica, impregnado com um verniz especial contendo partículas condutoras à base de carbono garantindo a resistividade superficial necessária para evitar as descargas provocadas pelo efeito corona.
A fita semicondutora é aplicada em maquinas com tensão nominal superior a 6000V e consiste de falso tecido de poliéster e uma resina especial em estágio B que contém partículas de carbeto de silício que dão as características necessárias para equalização do potencial.

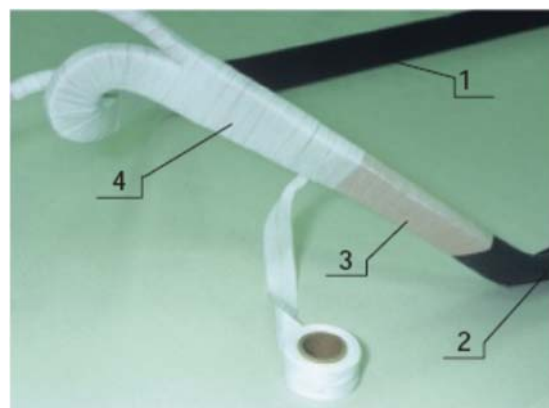



Figura 10.16: Bobina Pré-Formada – Acima de 6KV

1-Fita Condutora *3-Isolamento Principal*
2-Fita Semicondutora *4-Fita de Poliéster*

Após todas as bobinas serem isoladas, estas são inseridas no pacote do estator (Figura 10.20 e Figura 10.21) e as ranhuras são fechadas com cunhas magnéticas ou não magnéticas, dependendo da aplicação, a fixação destas cunhas é garantida pelo canal em rabo de andorinha na ranhura e pela utilização de um laminado expansível à base de manta de vidro.
A amarração das cabeças das bobinas é feita utilizando-se materiais altamente absorventes, (Figura 10.22) que juntamente com a impregnação pelo método VPI garantem a rigidez mecânica necessária às cabeças de bobinas para suportar as mais severas condições de funcionamento.

Figura 10.17: Processo mecanizado de formatação das bobinas.

Figura 10.18: Laboratório de bobinagem de alta tensão, fabricação e isolação das bobinas (cabeça de bobina).

Figura 10.19: Processo mecanizado de isolação das bobinas (Flat coil).

Figura 10.20: Inserção das bobinas nas ranhuras do estator.

Figura 10.21: Inserção das bobinas nas ranhuras do estator.

Figura 10.22: Ligação das bobinas e amarração das cabeças de bobina.

Após a inserção das bobinas, fechamento das ranhuras, conexões e amarrações das cabeças das bobinas, o estator bobinado é impregnado a vácuo e pressão utilizando-se uma resina epóxi classe H e isenta de solventes que garante ao sistema de isolamento WEG excelentes propriedades elétricas, mecânicas e resistência a intempéries.
As resinas epóxi são ideais para impregnações porque após cura apresentam excelente resistência a intempéries que são encontradas nos ambientes onde máquinas elétricas girantes são utilizadas. Por se tratarem de resinas 100% sólidas, isto é, não possuem solvente em sua composição, garantem maior homogeneidade e evitam a presença de bolhas de ar no isolamento após a polimerização e cura final.

Figura 10.23: Laboratório de impregnação (V.P.I.) de alta tensão.

Figura 10.24: Tanque de impregnação a vácuo.

Figura 10.25: Estufa (processo de polimerização e cura.

10.5 ROTOR

10.5.1 Rotor de Gaiola

a) Rotor injetado:

Os rotores de gaiola de alumínio injetado são fabricados com temperatura e pressão controlados, projetados para proporcionar:

- Altos conjugados de partida com baixas correntes com a facilidade de construção de ranhuras que simulam a dupla gaiola;
- Excelente rigidez mecânica;
- A partida de cargas com elevado momento de inércia;
- Suportar grande sobre-elevação de temperatura durante a partida;
- Baixo custo comparado com o rotor de barras de cobre.

Figura 10.26: Rotor de gaiola

Figura 10.27: Rotor de alumínio injetado.

b) Rotor de barras:

O núcleo do rotor é formado por chapas de aço silício. Possui canais axiais em todas as máquinas. Na linha H e M, nas carcaças menores, o pacote é contínuo sem canais radias de ventilação. Na linha M, carcaças maiores, a chapa é distanciada formando os canais radiais de ventilação, que permite elevada dissipação térmica. A parte ativa ou condutores, podem ser de barras de cobre ou latão. Especial atenção é dedicada para prevenir fadiga nas barras, ocasionadas pelas vibrações. Após colocação das barras nas ranhuras, é efetuada a solda do anel de curto-circuito através de solda prata, garantindo perfeita conexão elétrica entre ambas as partes.
Ainda, os rotores de barras podem apresentar vários formatos de barras com a variação das dimensões do perfil da barra. Essa gama de combinações possibilita um vasto controle dos parâmetros elétricos do motor como o conjugado máximo e de partida, rendimento, fator de potência e corrente de partida, entre outros.

Figura 10.28: Rotor de barras sem canais radiais de ventilação (linha H).

Figura 10.29: Rotor de barras com canais radiais de ventilação (linha M).

10.5.2 Rotor Bobinado (ou de Anéis)

As bobinas são confeccionadas com barras de cobre nu. Uma espira da bobina é composta por duas partes, as quais são soldadas entre si na cabeça de bobina. O isolamento das bobinas, normalmente, é por revestimento com fitas a base de mica em "estágio B" (catalisadas), sendo o mesmo processo do estator.
As bobinas são fixadas rigidamente dentro das ranhuras através de cunhas.
Os anéis coletores são fornecidos em aço inox (padrão), entretanto poderão ser fornecidos em bronze ou latão, dependendo da aplicação e do local onde serão instalados.
O rotor é curto-circuitado por intermédio do conjunto dos anéis coletores e escovas, os quais dão acesso ao enrolamento do rotor, estes são projetados para suportar a corrente máxima de operação necessária e a dissipação de calor gerado pela corrente elétrica e o contato entre escovas e anéis.
Através das escovas e do coletor é possível conectar uma resistência trifásica em série com os enrolamentos do rotor, variando-se assim a impedância do secundário do motor.
Com um reostato em série com o rotor é possível regular a corrente e o conjugado de partida ou nas condições de regime variar a rotação de trabalho através da variação do escorregamento.

Figura 10.30: Rotores bobinados ou de anéis.

a) Porta-escovas fixo:

No porta-escovas do tipo fixo as escovas permanecem em contato com o coletor permanentemente, pressionadas por molas do tipo pressão constante.
Neste tipo de porta-escovas as escovas têm sua vida útil limitada em função de um contato permanente com os anéis coletores. Fatores que influenciam na vida útil das escovas são: Percentual da carga em que o motor trabalha, tipo ou qualidade das escovas, ambiente da instalação entre outros.
Para esta configuração todo o conjunto (coletor, escovas e porta-escovas) são dimensionados para suportar as condições de partida e as de regime contínuo.

Figura 10.31: Porta-escovas fixo.

Figura 10.32: Motor redutor que aciona o sistema de levantamento das escovas

b) Porta-escovas com sistema motorizado de levantamento das escovas:

As características mecânicas são similares ao porta-escovas do tipo fixo, sendo que o levantamento das escovas é realizado por um dispositivo motorizado (ou manual), o qual permite o levantamento das mesmas e o curto-circuito dos anéis, através de um controle remoto e/ou local.

O sistema de levantamento motorizado de escovas traz importantes vantagens para a performance do motor de anéis ao longo dos anos:

a) Evita constante uso e desgaste prematuro das escovas e anéis coletores

b) Diminui significativamente paradas para manutenção e trocas de escovas.

c) Evita a acumulação de poeira dentro do compartimento interno do porta escovas mantendo o níveis de isolação do rotor o maior possível.

d) Aumenta a vida útil das escovas, porta escovas e consequentemente do motor.

A sequência de atuação do dispositivo de levantamento das escovas é a seguinte:

- O motor é acionado, e este através de um redutor aciona um anel que coloca as três fases em curto-circuito. Somente após essa operação todas as escovas são levantadas ou afastadas em relação ao coletor. Para baixar as escovas e colocar novamente o reostato em contato com o rotor, a sequência de operação é a inversa da informada acima.
- A operação de um motor com rotor bobinado curto-circuitado é igual à de um motor com rotor de gaiola. A manutenção é bastante reduzida porque não há desgaste das escovas.
- Para esta configuração o conjunto (coletor, escovas e porta-escovas) são dimensionados para suportar as condições de partida. Um motor que possui um dispositivo motorizado de levantamento de escovas não pode operar continuamente com as escovas baixadas, a não ser que esta condição foi informada inicialmente antes da construção.
- É recomendado o uso deste dispositivo quando a aplicação requerer poucas partidas por dia (Algo em torno de duas partidas por dia).

Figura 10.33: Levantamento das escovas

Figura 10.34: Coletor e porta-escovas do sistema de levantamento das escovas.

Figura 10.35: Porta escovas com dispositivo de levantamento automático/manual.

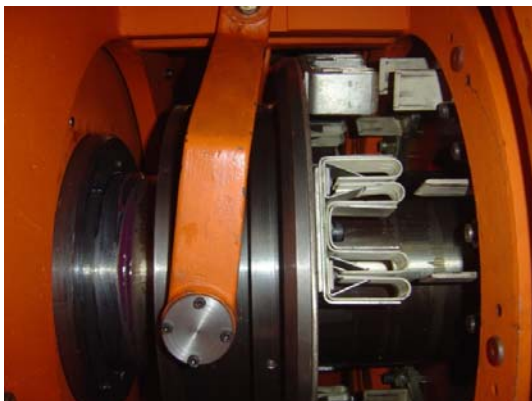



Figura 10.36: Mecanismo de curto-circuito dos anéis coletores.

10.6 CAIXA DE LIGAÇÃO

10.6.1 Caixa de Ligação do Estator

O material do invólucro pode ser fornecido em ferro fundido ou aço 1010/1020.
O grau de proteção da caixa geralmente é o mesmo do motor, porem pode ser maior dependendo da aplicação ou necessidade do cliente.
A entrada dos cabos de alimentação pode ser feita através de 1 (uma) ou mais entradas com rosca métrica, PG, RWG ou NPT ou com placa cega. Possibilita giros de 90 em 90 graus, dependendo do tipo e tamanho da caixa, isto se deve a existência ou não de acessório dentro da mesma e aplicação (deve ser informada a necessidade).
Para conexão à rede, barras, bornes, pinos de ligação, isoladores de Porcelana ou Epóxi, podem ser utilizados.

Figura 10.37: Caixa de ligação principal em aço.

Figura 10.38: Caixa de ligação principal em aço, com ponto neutro acessível.

Figura 10.39: Caixa de ligação principal em aço, com Para-Raios e Capacitores para surtos.

Figura 10.40: Caixa de ligação principal com para-raios, capacitor e Transformadores de Corrente.

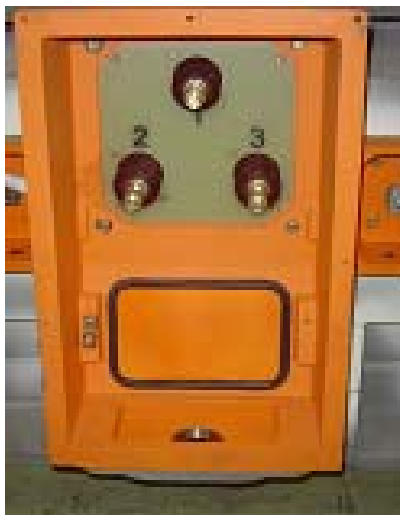



Figura 10.41: Caixa de ligação principal em ferro fundido.

10.6.2 Caixa de Ligação de Acessórios

É confeccionada em ferro fundido, independente da caixa de força, pode ser instalada no mesmo lado ou oposto a caixa principal. O grau de proteção da caixa é compatível com o do motor e seu posicionamento, normalmente, pode ser orientado de 90 em 90°.
Há normalmente 3 (três) entradas com rosca métrica, PG, RWG ou NPT, para os cabos de ligação.
O padrão é fornecer o motor com uma caixa para os acessórios de sinal (Pt100) e uma para os acessórios de força (resistência de aquecimento). Opcionalmente podem ser fornecidas quantas caixas de ligação de acessórios forem necessárias.

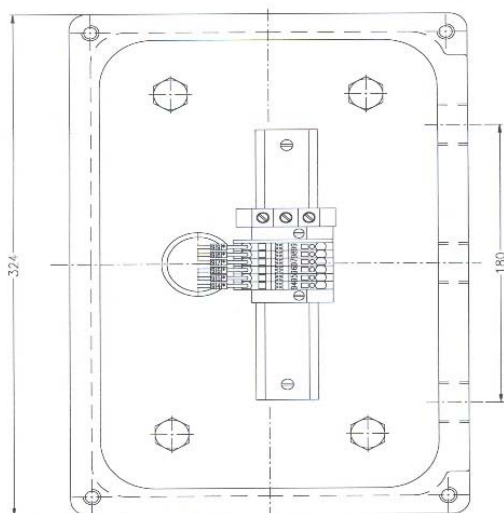
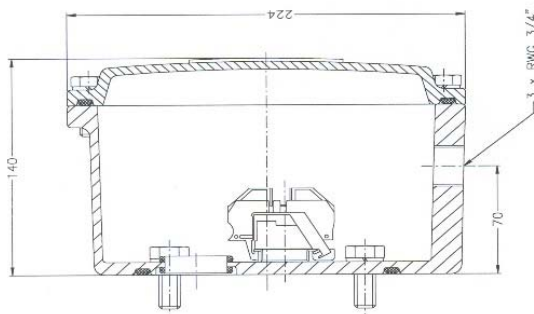



Figura 10.42: Caixas de ligação dos acessórios.

10.6.3 Caixa de Ligação do Rotor, Linha "M" com rotor de anéis

Confeccionada em aço, aloja os terminais de circuito do rotor através de uma placa de bornes. A entrada dos cabos de alimentação é feita por 1 (uma) ou mais entradas com rosca métrica, PG, RWG ou NPT ou placa cega conforme solicitado pelo cliente.

Figura 10.43: Caixa de ligação do rotor.

10.7 EIXO

São dimensionados para suportar os esforços mecânicos nas mais diversas aplicações. Dependendo do tipo de acoplamento poderão ser utilizados os seguintes materiais: AISI 1040/45, AISI 1524, AISI 4140 ou superiores, isto devido aos esforços radiais aplicados na ponta do eixo ou temperaturas ambientes severas.
Os eixos recebem um tratamento térmico com o objetivo de aliviar as tensões internas, evitar empenamentos e aumentar a resistência à fadiga provocada pelos esforços de torção e flexão.
Tipos de eixos:

- Oco: Aplicado em motores verticais com alto empuxo axial onde o peso da carga, é apoiado no motor sendo que o acoplamento é feito diretamente no motor;
- Maciço: Aplicado em motores onde o diâmetro do rotor é pequeno se comparado com o diâmetro da ponta de eixo necessário para aplicação.

- Costelado: Aplicado em motores onde o diâmetro do rotor é grande se comparado com o diâmetro da ponta de eixo necessário para aplicação.

Figura 10.44: Eixo Maciço.

Figura 10.45: Eixo Costelado. Chapas de aço (costelas) são soldadas no eixo principal.

10.8 VENTILADOR

Os sistemas de ventilação interno e/ou externo, são projetados para obter o máximo desempenho com baixo nível de poluição sonora. São construídos, para produzir o volume de ar necessário para a refrigeração e com baixo nível de ruído (atendendo as principais normas aplicadas a motores elétricos). Também são levadas em consideração outras características como momentos de inércias e rendimentos do motor.

Tipos:

a) Ventiladores radiais
- Motores bidirecionais
- Motores com IV polos ou mais.

b) Ventiladores axiais
- Motores com rotação unidirecional.
- Motores com II polos.
- Motores com exigência de baixo nível de ruído.

Figura 10.46: Ventilador radial.

Figura 10.47: Ventilador axial

10.9 PLACA DE IDENTIFICAÇÃO

A placa de identificação contém as informações que determinam as características nominais e de desempenho dos motores que são definidas pela NBR-17094.
Além das placas de identificação com as características principais da máquina, existem no motor outras placas, como: Mancais, TAG, advertência, acessórios, certificadora e outras.

Figura 10.48: Placas de identificação

10.10 PINTURA

A WEG Energia utiliza dois planos de pintura em seus produtos, nomeados 212P e 212E, ambos com três níveis de pintura (fundo, intermediário e acabamento), os quais são a solução para os diversos ambientes e aplicações. Todas as tintas utilizadas são fabricadas pela WEG Tintas o que garante um maior controle do processo e máxima qualidade. Estes planos seguem as normas e padrões da Petrobras e são aprovados pela estatal Brasileira.

10.10.1 Plano de pintura WEG Máquinas 212E

Aplicação: Ambiente marítimo agressivo ou industrial marítimo, abrigado, podendo conter alta umidade e respingos de álcalis e solventes. Indicado para aplicação em indústrias de papel e celulose, mineração, química e petroquímica.

Preparo da superfície: Jateamento abrasivo grau Sa 2 ½ (jato ao metal quase branco) da norma ISO 8501-1

Tinta fundo: Uma demão de “Primer Epóxi-pó de Zinco amida curada”, atende a Norma Petrobrás N 1277, espessura de película seca de 75 a 105 mm;

Tinta Intermediária: Uma demão de “Tinta Epóxi Fosfato de Zinco de Alta Espessura”, atende a norma Petrobrás N 2630, espessura de película seca 100 a 140 mm;

Tinta de Acabamento: Uma demão de “Tinta Epóxi Poliamida de Alta Espessura”, atende a norma Petrobrás N 2628, espessura de película seca 100 a 140 mm;

Cor Final de Acabamento: Azul – RAL 5009
Grau de brilho (ASTM D523): mínimo 60 UB
Aderência (ABNT NBR 11003): X0/Y0 a X2/Y2
Resistência à névoa salina (ISO 9227/06): mínimo 10.000 horas
Classificação (ISO 12944): C5-I e C5-M

I – Migração subcutânea: máx. 2,0 mm
II – Grau de empolamento: D0/T0
III – Grau de enferrujamento: F0

10.10.2 Plano de pintura WEG Máquinas 212P

Plano: 212P (Atende norma Petrobrás N 2919 a)
Aplicação: Ambiente marítimo agressivo ou industrial marítimo, abrigado ou desabrigado, podendo conter alta umidade. Indicado para aplicação em indústrias de papel e celulose, mineração, química e petroquímica.
Preparo da superfície:
Jateamento abrasivo grau Sa 2 ½ (jato ao metal quase branco) da norma ISO 8501-1

Tinta fundo:
Uma demão de “Primer Epóxi-pó de Zinco amida curada”, atende a Norma Petrobrás N 1277, espessura de película seca de 75 a 105 mm;

Tinta Intermediária:
Uma demão de “Tinta Epóxi Fosfato de Zinco de Alta Espessura”, atende a norma Petrobrás N 2630, espessura de película seca 100 a 140 mm;

Tinta de Acabamento:
Uma demão de “Tinta Poliuretano Acrílico de Alta Espessura”, atende a norma Petrobrás N 2677, espessura de película seca 70 a 98 mm;

Cor Final de Acabamento:
Azul – RAL 5009

Grau de brilho (ASTM D523): mínimo 85 UB
Aderência (ABNT NBR 11003): X0/Y0 a X2/Y2
Resistência à névoa salina (ISO 9227/06): mínimo 10.000 horas
Classificação (ISO 12944): C5-I e C5-M

I – Migração subcutânea: máx. 2,0 mm
II – Grau de empolamento: D0/T0
III – Grau de enferrujamento: F0

10.11 TERMINAIS DE ATERRAMENTO

O aterramento tem a finalidade de proteger os operadores de motores elétricos ou de máquinas acionadas pelos mesmos, contra possíveis curto-circuitos entre uma parte energizada e a carcaça do motor.
Esta proteção se dá pelo oferecimento de um caminho mais fácil para o fluxo, de corrente, assim, desviando-a do operador e da máquina.
Geralmente, o sistema de aterramento está localizado da seguinte forma:

- 01 terminal de aterramento no interior da caixa de ligação;
- 02 terminais de aterramento fixados na carcaça em lados opostos. O tipo de fixação pode ser por parafuso ou conector.

10.12 FORMAS CONSTRUTIVAS NORMALIZADAS

Entende-se por forma construtiva, o arranjo das partes construtivas das máquinas com relação a sua fixação, a disposição de seus mancais e a ponta de eixo; que são padronizadas pela NBR-5031, IEC 60034-7, NEMA MG 1-4.

Tabela 10.1: Formas construtivas normalizadas pela NBR5031

Forma Construtiva	Configuração							
	Referência	B3E	B3D	B5E	B5D	B35E	B35D	B14E
Detalhes	Carcaça	com pés	com pés	sem pés	sem pés	com pés	com pés	sem pés
	Ponta de eixo	à esquerda	à direita	à esquerda	à direita	à esquerda	à direita	à esquerda
	Fixação	base ou trilhos	base ou trilhos	flange FF	flange FF	base ou flange FF	base ou flange FF	flange FC
Forma Construtiva	Configuração							
	Referência	B14D	B34E	B34D	V5	V6	V1	V3
Detalhes	Carcaça	sem pés	com pés	com pés	com pés	com pés	sem pés	sem pés
	Ponta de eixo	à direita	à esquerda	à direita	para baixo	para cima	para baixo	para cima
	Fixação	flange FC	base ou flange FC	base ou flange FC	parede	parede	flange FF	flange FF
Forma Construtiva	Configuração							
	Referência	V15	V36	V18	V19	B6	B7	B8
Detalhes	Carcaça	com pés	com pés	sem pés	sem pés	com pés	com pés	com pés
	Ponta de eixo	para baixo	para cima	para baixo	para cima	para frente	para frente	para frente
	Fixação	parede ou flange FF	parede ou flange FF	flange C	flange C	parede	parede	teto

10.13 MANCAIS

Dispositivo mecânico sobre o qual se apóia um eixo girante (no caso do motor elétrico), deslizante ou oscilante, e que lhe permite o movimento com um mínimo de atrito.
Devido à grande importância dos mancais para o motor como um todo, segue abaixo alguns fatores que determinam a sua durabilidade:

- Velocidade de operação;
- Esforços axiais e radiais aplicados aos mesmos;
- A correta manutenção e lubrificação;
- As condições ambientais a qual é submetido.

O tipo de mancal a ser selecionado está intimamente ligado com o tipo de aplicação, sendo eles divididos em:

10.13.1 Mancal de Rolamento:

A lubrificação destes pode ser a graxa, opcionalmente imerso em óleo ou ainda com névoa de óleo (“Qil Mist”).

Tipos:

- Rolamentos de Esferas: É o padrão utilizado na Weg Máquinas.
- Rolamentos de Rolos: Usado com cargas com forças radiais elevadas.
- Obs.: Não pode ser utilizado em motores II polos, devido à velocidade crítica estar próxima da velocidade síncrona do motor.
- Rolamento de Contato Angular: Para cargas com esforços radiais e axiais maiores do que o limite de rolamentos de esferas.
- Rolamento de Rolos Cônicos: Para cargas com elevados esforços radiais e axiais.

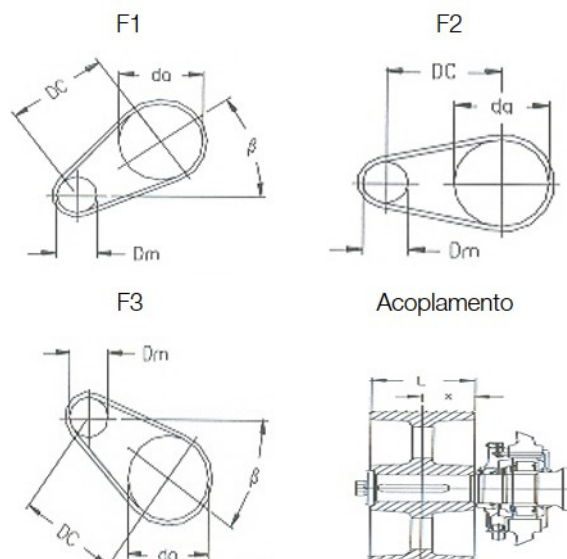
Limites de temperatura:
110°C (Alarme)
120°C (Desligamento)

Figura 10.49: Motor com mancal de rolamento a graxa.

Figura 10.50: Motor com mancal de rolamento a óleo.

Figura 10.51: Rolamentos.

10.13.2 Dimensionamento do mancal e Eixo para Acoplamento por Polias e Correias

Quando o acoplamento se dá por polias e correias deve-se tomar cuidado especial com o eixo e mancais do motor. O peso da polia motor em conjunto com a força resultante da correia resulta em um esforço radial na ponta de eixo. Normalmente é necessário reforçar o eixo e o rolamento para suportar o esforço radial.
Nesta condição a Weg Energia tem como padrão aumentar o diâmetro da ponta de eixo, usar rolamento de rolos e usar aço AISI 4140 no eixo.
Para o correto dimensionamento do eixo e do mancal e evitar a quebra do eixo ou do rolamento são necessários os dados a seguir:

- Tipo de Correia (V ou Plana)?
- Quantidade de Correias?
- Diâmetro da polia motora (DM)?
- Diâmetro da polia movida (da)?
- Distância entre os centros das polias (DC)?
- Largura da polia (L)?
- Distância entre o centro das correias ao encosto do eixo (x)?
- Qual das figuras acima refere-se a aplicação? F1, F2, F3.
- Qual o ângulo entre as duas polias -(Beta)?

10.13.3 Mancal de Bucha

Os mancais (casquilhos) são separados em dois setores corretamente posicionados por pinos e este fato permite a sua inspeção sem necessidade da retirada do motor do local da instalação. Dependendo da necessidade de projeto, podem ser isolados eletricamente da carcaça do motor, impedindo assim a circulação de correntes parasitas pelo eixo da máquina.
Apresenta uma folga axial de alguns milímetros, que varia com o tamanho do mancal. A montagem do rotor é feita de tal maneira que o centro magnético do motor fique na posição tal que o rotor tenha folga para os dois lados, ou seja, a folga axial fique dividida por dois. Para indicar a posição do centro magnético há um indicador fixo no mancal dianteiro que indica a posição correta na direção de três marcas em cima da ponta de eixo. Uma marca indica o limite do rotor para trás, a outra o limite do rotor para frente e a do centro é a posição do centro magnético (posição de montagem e trabalho do motor).

NOTA

O motor deve ser acoplado de tal maneira que o indicador fique posicionado na marca central (ver na ponta de eixo). Caso o mancal trabalhe encostado para frente ou para trás, o mancal sofrerá sobreaquecimento que poderá ocasionar a queima do mesmo.

Algumas vantagens do mancal de bucha em relação ao rolamento:
- Elevada vida Util.
- Suporta elevadas rotações.
- Suporta maior esforço radial combinado com a rotação.

A principal desvantagem em relação ao rolamento se dá em relação ao seu custo.
Limites de temperatura:
120ºC - Desligamento
110ºC – Alarme

Figura 10.52: Motor com mancal de bucha.

Figura 10.53: Casquilho e anel pescador.

Figura 10.54: Motor com mancal de bucha tipo pedestal

Abaixo seguem os desenhos esquemáticos dos mancais de deslizamento a óleo, indicando cada uma de suas partes.

Mancal de Bucha dianteiro

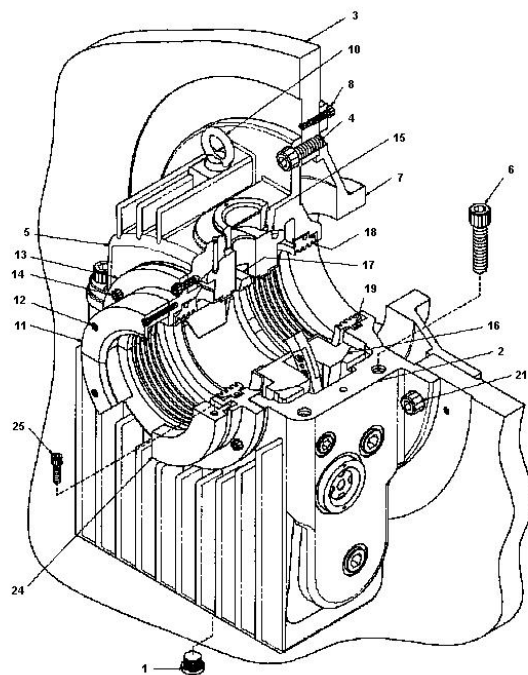



Figura 10.55: Mancal de bucha dianteiro

Onde:
1. *Bujão de dreno*
2. *Carcaça do mancal*
3. *Carcaça do motor*
4. *Parafuso para montagem da capa da carcaça do mancal*
5. *Capa da carcaça do mancal*
6. *Parafuso da capa do mancal bipartido*
7. *Selo máquina*
8. *Parafuso do selo máquina*
10. *Olhal de suspensão*
11. *Defletor estacionário*
12. *Parafuso do defletor estacionário*
13. *Portador do selo labirinto*
14. *Parafuso do portador do selo labirinto*
15. *Casquilho superior*
16. *Casquilho inferior*
17. *Anel pescador*
18. *Selo labirinto*
19. *Mola circular elástica*
21. *Parafuso de montagem da carcaça do mancal carcaça do mancal*
24. *Defletor inferior*
25. *Parafuso de união dos defletores*

Mancal de Bucha traseiro

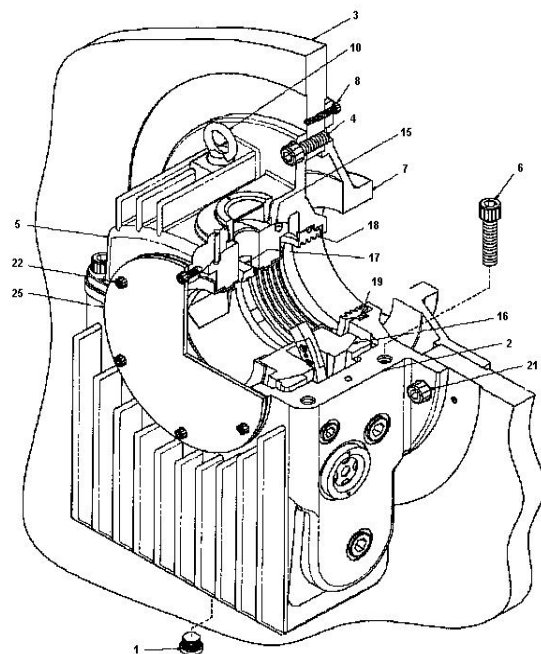



Figura 10.56: Mancal de bucha traseiro

Onde:
1. *Bujão de dreno*
2. *Carcaça do mancal*
3. *Carcaça do motor*
4. *Parafuso para montagem da capa da carcaça do mancal*
5. *Capa da carcaça do mancal*
6. *Parafuso da capa do mancal bipartido*
7. *Selo máquina*
8. *Parafuso do selo máquina*
10. *Olhal de suspensão*
15. *Casquilho superior*
16. *Casquilho inferior*
17. *Anel pescador*
18. *Selo labirinto*
19. *Mola circular elástica*
21. *Parafuso de montagem da carcaça do mancal carcaça do mancal*
22. *Defletor inferior*
23. *Parafuso de união dos defletores*

10.14 LIMITES DE RUÍDOS

Os motores WEG atendem as normas NBR, IEC e NEMA que especificam os limites máximos de nível de potência sonora, em decibéis. Os valores da Tabela 10.2 listam como exemplo, os valores limites estabelecidos pela IEC 60034-9 para motores de indução trifásicos IC411, IC511 e IC611 - 50Hz.

NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA EM dB(A)

Tabela 10.2: Nível de potência sonora em dB(A) extraído da IEC60034-9

Altura do eixo, *H* mm	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
90	78	66	63	63
100	82	70	64	64
112	83	72	70	70
132	85	75	73	71
160	87	77	73	72
180	88	80	77	76
200	90	83	80	79
225	92	84	80	79
250	92	85	82	80
280	94	88	85	82
315	98	94	89	88
355	100	95	94	92
400	100	96	95	94
450	100	98	98	96
500	103	99	98	97
560	105	100	99	98

NOTA 1 Motores com métodos de resfriamento IC01, IC11 e IC21 podem apresentar níveis de potência sonora mais elevadas, como indicado a seguir:
2 e 4 polos: + 7 dB(A); 6 e 8 polos: + 4 dB(A).

NOTA 2 Os níveis de potência sonara para motores de 2 e 4 polos com alturas de eixo > 315 mm consideram uma configuração de ventilador direcional. Todos os outros valores são referentes a ventiladores bidirecionais.

NOTA 3 Valores de potência sonora para motores de 60 Hz são aumentados de acordo o seguinte critério:
2 polos: + 5 dB(A); 4, 6 e 8 polos: + 3 dB(A).

Com o objetivo de limitar ainda mais os níveis de ruído nos motores a WEG está constantemente desenvolvendo vários tipos de abafadores ou atenuadores de ruídos, que possibilitam obter valores bem abaixo da Tabela 10.2.
Os níveis de ruído podem ser reduzidos aplicando uma ou mais características listadas abaixo:
- Abafadores e atenuadores de ruído
- Uso de carenagem (HGF)
- Utilizando-se mancais de deslizamento
- Ventiladores unidirecionais

A medição do nível de ruído é executada conforme representado na Figura 10.57, a uma distância de um metro (1m), seguindo a sequência de 1 a 8. O valor informado nas folhas de dados sempre é o valor médio dos 8 pontos.

As medições, normalmente feitas em laboratório ou no campo, são em Pressão Sonora, sendo que a tabela da norma é em Potência Sonora.

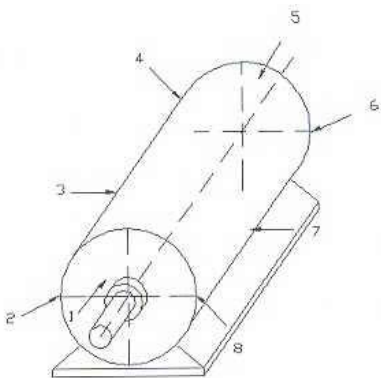



Figura 10.57: Pontos de medição do Nível de Ruído.

A transformação de Potência Sonora para Pressão Sonora, conforme abaixo (Norma IEC60034-9):
Lp = Lw – 10.log (S/So)
Lp – é o nível de pressão sonora em campo aberto em uma superfície de reflexão a 1m da máquina.
Lw – é o nível de potência sonora determinado conforme procedimento desta norma.
So – é 1m².
S – é a superfície que envolve a máquina a 1m, de acordo com a norma ISO3744 e a seguinte regra:
Altura de eixo <=280mm → Área da superfície (S) é um hemisfério (m²).
Altura de eixo >280mm → Área da superfície (S) é um paralelepípedo (m²).

10.15 VIBRAÇÃO

A vibração de uma máquina elétrica está intimamente relacionada com sua montagem e por isso é geralmente desejável efetuar as medições de vibração nas condições reais de instalação e funcionamento.
A Tabela 10.3 indica os valores admissíveis para a máxima velocidade de vibração, para motores elétricos, para dois graus: A e B - conforme norma IEC 60034-14.
Grau A: Aplicado a máquinas sem exigências especiais de vibração.
Grau B: Aplicado em máquinas com exigências especiais de vibração. Montagem rígida não é considerada aceitável para máquinas com altura de eixo menor que 132mm.

Tabela 10.3: Limites de Vibração (mm/s).

Classe de Balancea-mento	Montagem	Valor Limite da Velocidade de Vibração (mm/s) para Carcaças		
		56 a 132	132 a 280	H > 280
A	Livre	1,6	2,2	2,8
	Rígida	1,3	1,8	2,3
B	Livre	0,7	1,1	1,8
	Rígida	--	0,9	1,5

Medição de velocidades relativas do eixo são recomendadas somente para maquinas com velocidades acima de 1200 rpm e fornecidas com mancal de bucha ou com previsões necessárias para a instalação de transdutores de medição.
A Tabela 10.4 indica os valores admissíveis para a máxima amplitude de vibração, para motores elétricos, para dois graus: A e B - conforme norma IEC 60034-14.

Tabela 10.4: Limites de Vibração (μm).

Classe de Balancea-mento	Faixa de Velocidade min^{-1}	Máxima amplitude de vibração relativa no eixo (μm)
A	> 1800	65
	≤1800	90
B	> 1800	50
	≤1800	65

10.15.1 Pontos de Medição

As medições da severidade de vibração devem ser efetuadas sobre os mancais, na proximidade do eixo, em três direções perpendiculares, com a máquina funcionando na posição que ocupa sob condições normais (com eixo horizontal ou vertical). A localização dos pontos de medição e as direções a que se referem os níveis da severidade de vibração estão indicadas na Figura 10.58.

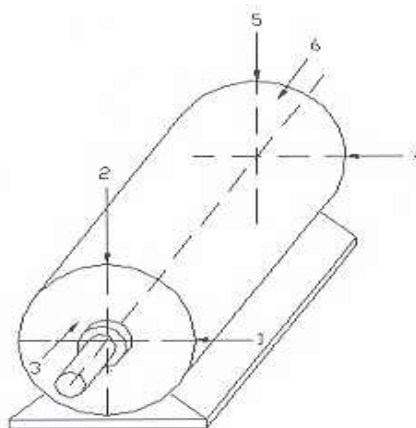



Figura 10.58: Pontos de Medição para velocidades de vibração

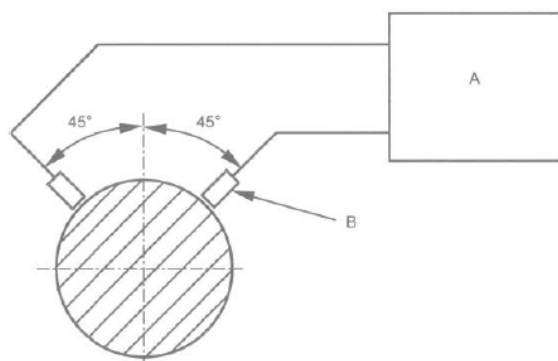



Figura 10.59: Posições recomendadas para medição de vibração relativa no eixo.

10.16 BALANCEAMENTO

Conforme a NBR-8008, balanceamento é o processo que procura melhorar a distribuição de massa de um corpo, de modo que este gire em seus mancais sem forças de desbalanceamento.
Os processos de balanceamento da WEG seguem as normas ISO 1940 e NBR-8008 que definem o relacionamento do desbalanceamento admissível em função da máxima velocidade de operação.

Muitas vezes não é fácil reconhecer a relação entre o desbalanceamento do rotor e as vibrações da máquina sob condições de operação. As vibrações da máquina podem provir apenas parcialmente da presença de desbalanceamento do rotor.

A amplitude das vibrações é influenciada por vários fatores, tais como:

- Massa vibratória das carcaças da máquina e sua fundação.
- A rigidez dos mancais e fundação.
- Aproximação da velocidade de operação em
- Relação a várias frequências de ressonância, etc.
- Problemas de montagem da máquina, acoplamento, ou do conjunto máquina acionante / acoplamento / carga.
- Projeto estrutural da máquina, acoplamento ou da carga

Figura 10.60: Balanceamento

11 CARACTERÍSTICAS DE PARTIDA

11.1 LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PARTIDA

Sempre que possível a partida de um motor trifásico de gaiola, deverá ser direta na rede ou plena tensão, por meio de contatores à vácuo e/ou disjuntores. Deve-se ter em mente que para um determinado motor as curvas de conjugados e corrente são fixas (quem determina o seu valor é a parte física do motor), independente da dificuldade de partida, para uma tensão constante.
Nos casos em que a corrente de partida do motor é elevada podem ocorrer as seguintes consequências prejudiciais:

a) Elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede, provocando interferência em equipamentos instalados neste sistema;
b) O sistema de alimentação (cabos, chaves, proteção, transformador) deverá ser sobre dimensionado, elevando os custos;
c) A imposição das concessionárias de energia elétrica que limitam a queda de tensão da rede;
d) Limitação no caso de redes isoladas operando com grupos geradores.

Caso a partida direta na rede não seja possível, devido aos problemas citados acima, pode-se usar sistema de partida indireta para reduzir a corrente de partida.
Estes sistemas de partida indireta (tensão reduzida, variação de frequência, por resistência) são:

- Chave estrela-triângulo;
- Chave compensadora ou auto-trafo;
- Chave de partida estática ou soft-start;
- Inversor de frequência;
- Reostato para motores de anéis.

11.1.1 Chave Estrela-Triângulo

É fundamental para a partida com chave estrela-triângulo que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, ou seja, em 1350/2300V, em 2400/4160V ou 3800/6600V. Os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação.
A partida estrela-triângulo poderá ser usada quando a curva de conjugados do motor é suficientemente elevada para poder garantir a aceleração da máquina com a corrente reduzida. Na ligação estrela, o conjugado fica reduzido para 25 a 33% do conjugado de partida e a corrente de partida para 33% do valor em da ligação triângulo. Por este motivo, sempre que for necessária uma partida estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com conjugado de partida elevado.
Os motores Weg, quando solicitado pela aplicação, são projetados para obter alto conjugado máximo e de partida, sendo, portanto, aptos à maioria dos sistemas de partida, inclusive estrela-triângulo. Entretanto, o alto custo dos contatores e/ou disjuntores a vácuo, normalmente inviabiliza este tipo de partida para motores de alta tensão.
No gráfico a seguir:
I_Δ = corrente na ligação delta;
C_Δ = conjugado na ligação delta;
I_Y = corrente na ligação estrela;
C_Y = conjugado na ligação estrela;
n = rotação síncrona;
n_c = tempo ou rotação em que deverá ocorrer a comutação Y/Δ.

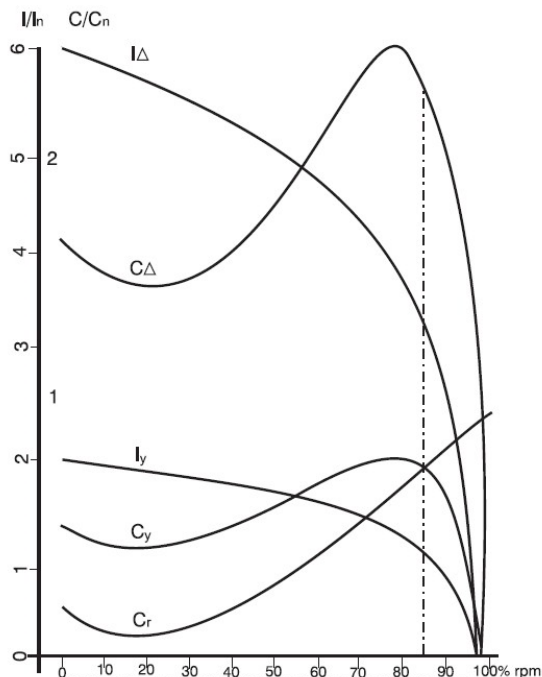
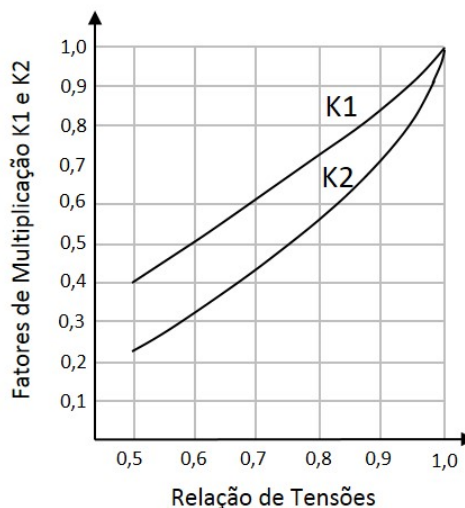



Figura 11.1: Partida estrela-triângulo.

> **NOTA**
> O método de partida estrela-triângulo é pouco usado em motores de média e alta tensão.

11.1.2 Chave Compensadora (Autotransformador)

Para motores que irão partir com uma tensão menor que a tensão nominal, a corrente e o conjugado de partida deverão ser multiplicados pelos fatores K_1 (fator de multiplicação da corrente) e K2 (fator de multiplicação do conjugado) obtidos no gráfico da Figura 11.2.

$$\left(\frac{I_p}{I_n}\right)_U = k_1 \cdot \left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{Un}$$

$$\left(\frac{C_p}{C_n}\right)_U = k_2 \cdot \left(\frac{C_p}{C_n}\right)_{Un}$$

$$\left(\frac{C_{máx}}{C_n}\right)_U = k_2 \cdot \left(\frac{C_{máx}}{C_n}\right)_{Un}$$

Figura 11.2: Fatores de redução K1 e K2.

A chave compensadora pode ser usada para a partida de motores sob carga. Ela reduz a corrente de partida, evitando uma sobrecarga no circuito, deixando, porém, o motor com um conjugado "suficiente" para a partida e aceleração. A tensão na chave compensadora é reduzida através de autotransformador que possui normalmente taps de 50, 65 e 80% da tensão nominal.

11.1.3 Partida Estática ou Soft-Starter

O avanço da eletrônica permitiu a criação da chave de partida a estado sólido a qual consiste de um conjunto de pares de tiristores (SCR, ou combinações de tiristores/diodos), um em cada borne de potência do motor.
O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para uma tensão variável aos terminais do motor durante a "aceleração". Este comportamento recebe o nome de "partida suave" (soft-starter). No final do período de partida, ajustável conforme a aplicação, a tensão atinge seu valor pleno após uma aceleração suave ou uma rampa ascendente, ao invés de ser submetido a incrementos ou "saltos" repentinos, como ocorre com os métodos de partida por autotransformador e ligação estrela-triângulo. Com isso, consegue-se manter a corrente de partida (na linha) dentro de um limite estipulado e com suave variação, como desejado. O valor limite de corrente permitido no motor é função da aplicação e do projeto do motor. Além da vantagem do controle da tensão (e por consequência da corrente) durante a partida, a chave eletrônica apresenta, também, a vantagem de não possuir partes móveis ou que gerem arco elétrico, como nas chaves mecânicas. Este é um dos pontos fortes das chaves eletrônicas, pois sua vida útil é bem mais longa (permite até centenas de milhões de manobras).

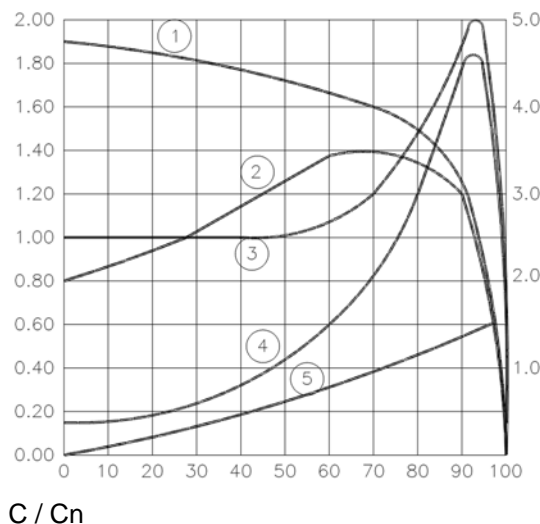



Figura 11.3: Partida Direta e com Soft-Starter por rampa de tensão.

Onde:
1. Corrente de partida direta;
2. Corrente de partida com soft-starter;
3. Conjugado com partida direta;
4. Conjugado com soft-starter;
5. Conjugado da carga.

11.1.4 Partida com Inversor de Frequência

Por muitos anos, motores CA foram usados estritamente em aplicações de velocidade constante. Tradicionalmente, com bombas, ventiladores e compressores, o controle da vazão também foi realizado através de meios mecânicos como o estrangulamento de válvulas e abafadores. Quando a velocidade variável era requerida, motores CC, juntamente com turbinas e motores de combustão interna, eram escolhidos.
Os adventos de acionamentos de velocidade variável, confiáveis e de custo efetivo, mudaram rapidamente estes procedimentos. Estes acionamentos, que regulam a velocidade do motor, controlando a tensão e a frequência da rede, têm alargado vastamente a abrangência das aplicações e capacidades dos motores CA.
O uso de controles de frequência ajustável, entretanto, impacta no projeto, desempenho e confiabilidade dos motores CA. Muitos efeitos são positivos. Velocidades baixas significam ciclos menores (portanto fadiga minimizada) dos rolamentos, ventoinhas e outros elementos girantes. A "Partida Suave" de um motor elimina os altos esforços da partida nos enrolamentos do estator e barras do rotor que são usuais quando a partida ocorre diretamente na rede.
Acionamentos de frequência ajustável podem influenciar positivamente a vida útil do motor, quando adequadamente aplicados. Há, contudo, uns poucos fatores importantes que devem ser considerados quando do uso de motores com estes acionamentos. Estes problemas são bem definidos e administráveis e a seguir abordados. A ocorrência de problemas, com a instalação destes acionamentos, será significativamente reduzida quando estes fatores já são considerados adequadamente na especificação técnica inicial.

Aspectos adicionais a serem considerados na Especificação de Motor com Velocidade Variável.

Aplicações com velocidade variável possuem mais dos problemas de aplicação do que os motores com velocidade constante, tais como, requisitos específicos da carga, integridade da isolação, vibrações, qualidade dos materiais e da construção. Há cinco aspectos adicionais que devem ser levados atentamente em consideração quando especificados motores para aplicações com velocidade variável:

- Tensão de "Modo Comum";
- Harmônicas;
- Frequências de Chaveamento e Ondas Estacionárias;
- Faixa de Velocidade;
- Aspectos na Partida.

1. Tensão de modo comum

Quando operado diretamente conectado à rede, o motor é alimentado pela tensão de entrada trifásica. Com uma fonte de alimentação regular (equilibrada) trifásica, a soma de todos os vetores de fase é zero, o neutro é estacionário e é usualmente mantido aterrado. Uma ponte retificadora trifásica é a fonte de alimentação de um motor acionado por Inversor de Frequência. Em operação, somente duas fases conduzem simultaneamente, portanto, a soma vetorial não é zerada. O centro do Link CC movimenta-se e tem valores de tensão positivos e negativos com relação ao terra (tensão de "Modo Comum"), com magnitudes que variam com o ângulo de disparo da ponte retificadora.

A magnitude da tensão de Modo Comum em cada perna da ponte pode ser igual à metade da tensão nominal Fase-Neutro. Assim, a tensão total aplicada nas fases do motor com conversor CA-CA pode ser duas vezes a tensão nominal de fase.

2. Harmônicas

Os efeitos das harmônicas geradas pelo acionamento podem afetar a operação, vida útil e desempenho do motor. Estes efeitos podem ser divididos em 3 categorias: aquecimento, dielétrico e mecânico.

A Figura 11.4 ilustra um exemplo de forma de onda de tensão (P.W.M.) e corrente que pode ser fornecida à um motor por um inversor de frequência.

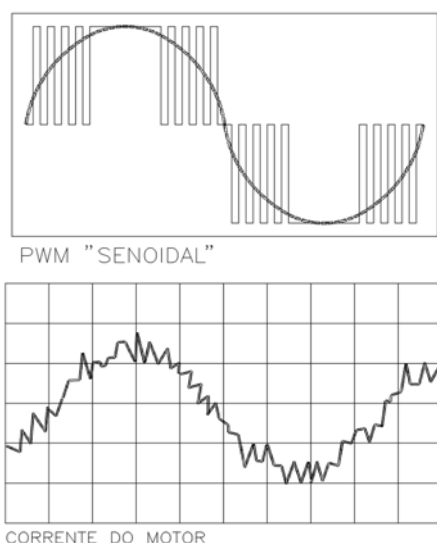



Figura 11.4: Tensão e corrente no motor.

As harmônicas de corrente são aditivos à corrente fundamental, portanto geram calor adicional nos enrolamentos do motor. Mesmo um valor de 30% (trinta por cento) de distorção de corrente num motor, não gera mais que 8% (oito por cento) de calor adicional (devido principalmente aos enrolamentos do motor que se comportam como um filtro).

É necessário que o fornecedor do acionamento supra o fornecedor do motor com informações sobre as harmônicas geradas para permitir que o motor seja devidamente projetado com a adequada capacidade de absorção/dissipação de calor para contra-balancear qualquer perda e/ou aquecimentos adicionais. Um motor operando com velocidade variável através de um inversor de frequência deve atender os mesmos limites de elevação de temperatura que um motor operando com onda senoidal pura.

As harmônicas de corrente podem originar emissão maior de ruído audível. Os motores devem demonstrar que o limite de nível ruído sonoro é atendido quando estes são acionados por inversores estáticos de frequência. Ainda, as harmônicas também contribuem com o "Torque Pulsante". O torque pulsante causa excitações torcionais que podem ter consequências destrutivas se não forem apropriadamente dirigidas.

Em casos extremos, a magnitude da pulsação é suficientemente grande para criar contratorques. Em aplicações com baixa inércia tais como bombas centrífugas diretamente acopladas, usualmente há pouco perigo. Porém, aplicações em ventiladores ou em compressores de alta velocidade com redutores de alta inércia há alto risco potencial. Esta situação potencialmente perigosa pode ser analisada e evitada com segurança.

Uma análise torcional é normalmente realizada nos elementos mais importantes do trem de acionamento. Com acionamento de velocidade variável, itens adicionais devem ser acrescentados para análise. O Torque Pulsante deve ser incluído, pois as magnitudes deste e a fadiga resultante podem então ser calculados. Em outros casos, pode ser requerida a modificação do diâmetro do eixo e fatores de concentração de tensões, para evitar falhas por fadiga nos elementos do trem de acionamento.

3. Frequências de chaveamento e ondas estacionárias

Além da possibilidade de gerar calor adicional, as formas de ondas dos acionamentos podem ter outros efeitos diretos no sistema de isolação dos motores. Todos os acionamentos estáticos, utilizam-se de dispositivos eletrônicos de chaveamento na sua secção de inversão. A ação do chaveamento (liga-desliga) produz picos e transientes de tensão e corrente que afetam de forma variada a isolação do motor.

Ocasionados pela frequência de chaveamento, picos de tensão ou alto dV/dt, terão impacto na vida útil dos enrolamentos do motor. A frequência e amplitude, desses surtos todos, influenciam a vida do isolamento e a provável forma de defeito.

Uma recomendação conservadora e justa seria requerer que o fabricante do acionamento especificasse ao fabricante do motor qualquer outro requisito especial de isolação (visto que a utilização de filtros encareceria demais o inversor). Quando necessário (geralmente acima de 20m) o usuário deverá prover ao fabricante do inversor/motor os comprimentos estimados dos cabos, pois a partir deste comprimento o aumento da capacitância da linha em relação ao terra ocasiona a amplificação (pelo fenômeno da reflexão) dos picos de tensão, que podem danificar o isolamento do motor. Este efeito pode ser minimizado colocando filtros reativos na

saída do conversor ou aumentando o isolamento das bobinas do motor.

4. Faixa de Velocidade

Apesar da inércia não ser um problema para o motor com partida suave o é para o acionamento com inversor de frequência. Aplicações com centrífugas requerem que o motor e acionamento sejam dimensionados para as condições de máxima velocidade de operação.
Cargas alternativas (ou outras cargas com toque constante, tais como estrusoras, britadores e alguns tipos de sopradores e compressores) devem ser dimensionadas para condições de velocidade mínima operacional.
De qualquer ponto de vista razoável, os dados reais de carga devem ser fornecidos para todos os fornecedores de motores a fim de assegurar-se que o motor será capaz de partir e acelerar a carga e funcionar dentro dos limites especificados de temperatura e sob todas as condições de operação.
Na maioria das aplicações com velocidade variável, a máxima velocidade de operação é ou está perto da rotação nominal de um motor padrão ligado diretamente à rede.
As operações em baixa velocidade não partilham os mesmos problemas de integridade mecânica das operações em alta velocidade, mas certamente partilham os problemas de mancais, lubrificação e de refrigeração. A mínima velocidade de operação deve ser especificada na Especificação ou Folha de Dados, tendo em vista que o sistema de refrigeração do motor está ligado intimamente à sua rotação.
Operação à velocidade crítica pode resultar em níveis de vibração altos que podem levar à falha por fadiga dos componentes do trem de acionamento. Para evitar este risco, deve-se especificar uma máquina que não tenha qualquer frequência crítica dentro da faixa de operação pretendida, ou fazer com que o inversor de frequência "pule" esta rotação.
Para a maioria das aplicações com motores de 04 polos e maiores, na faixa de 50% a 100% da velocidade, tal solução é normal. Porém, com motores de 02 polos ou faixas mais amplas de variação de velocidade pode haver uma grande oportunidade para surgimento de problemas. Em motores maiores, de mais alta velocidade estas soluções podem ser custosas ou indisponíveis.
Utilizar motores que tenham frequências críticas na faixa de operação é possível, se eles tiverem uma resposta em frequência bem amortizada. Alternativamente, o controle pode ser bloqueado para operações em frequências bem definidas, que por sua vez limita a flexibilidade operacional do acionamento.

5. Aspectos na Partida

Um aspecto positivo na operação de motores com acionamento de frequência variável é a partida suave. As instalações típicas de acionamento são configuradas para limitar a corrente do motor a 100% da nominal, eliminando assim os esforços de partida no isolamento do motor e na rede de alimentação.
A maioria das aplicações são projetadas para manter a relação V/Hz constante, mantendo o fluxo eletromagnético no entreferro do motor uniforme, desta maneira, nas baixas frequências a tensão será baixa (ver Figura 11.5).

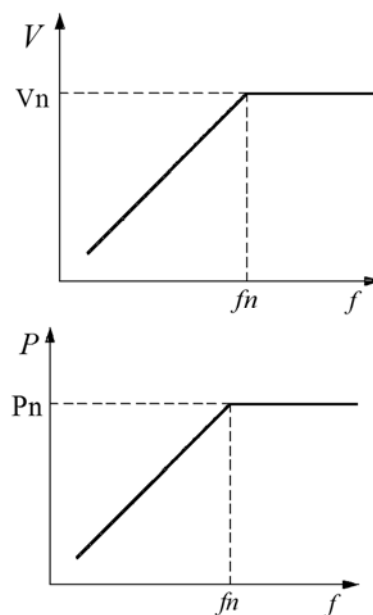



Figura 11.5: Variação linear de tensão e frequência.

Durante as partidas o acionamento controla a tensão e frequência para permitir que o motor trabalhe próximo do escorregamento e fluxo nominais e esteja operando, na porção estável da curva Torque x r.p.m. Assim, para a maioria das aplicações e certamente para as cargas centrífugas, as correntes de partida são muito baixas, a aceleração é suave e controlada, e por causa do baixo escorregamento, o aquecimento do rotor é bastante reduzido.

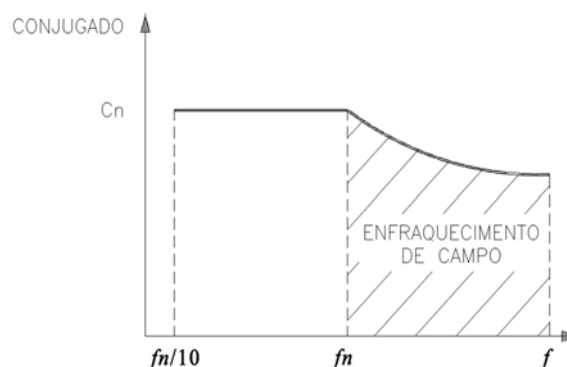



Figura 11.6: Curva típica de motor aplicado à inversor de frequência.

<u>Considerações Importantes:</u>
Quanto menor a tensão e a frequência do estator, mais significativa é a queda de tensão neste, de modo que para baixas frequências, mantendo-se a proporcionalidade entre a frequência e a tensão, o fluxo e consequentemente o conjugado da máquina diminui bastante. Para que isto seja evitado, a tensão do estator para baixas frequências deve ser aumentada, através da compensação IxR, conforme Figura 11.7:

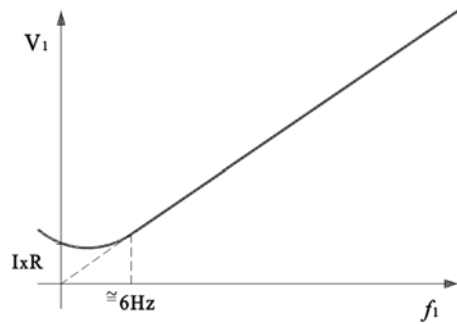



Figura 11.7: Curva Característica V/f com compensação I x R.

Para a faixa compreendida entre 0 a aproximadamente 6 Hz, a relação entre V1 e f1 não é determinada facilmente, pois dependem tanto de f1 (frequência estatórica) como de f2 (frequência rotórica). Portanto, a elevação da tensão em baixas frequências depende também da frequência do escorregamento e consequentemente da carga;

1) Relações V1/f1 acima dos valores nominais estão limitadas em função de que para altos valores de tensão ocorre a saturação e o consequente enfraquecimento do campo. Combinando as equações já apresentadas e com a consideração de pequenos valores de escorregamento e supondo f2 proporcional a f1, podemos dizer que:

O conjugado máximo decresce com o quadrado do aumento da velocidade (1/n2);

- O conjugado nominal decresce hiperbolicamente com o aumento da velocidade (1/n), e decresce aproximadamente com o quadrado da redução do fluxo (ϕ2);
- O valor aproximado da velocidade máxima com potência constante é:

$$n_{max} < \left(\frac{C_{max}}{C_{nom}} \right) \cdot n_{nom}$$

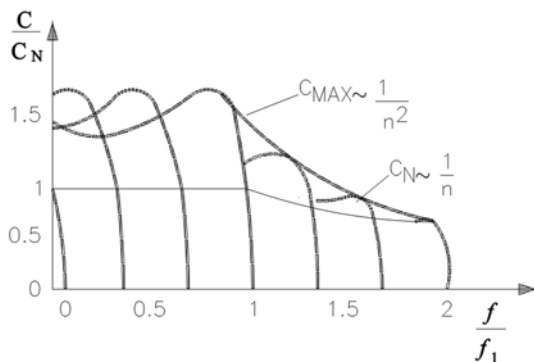



Figura 11.8: Enfraquecimento de campo para valores de tensão e frequência acima dos nominais.

2) Em função de que as formas de onda, tanto de tensão como de corrente, produzidas pelos conversores de frequência não são senoidais puras, ou seja, possuem um alto conteúdo de harmônicos de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem, as perdas nos motores são maiores. Ainda, em função dos picos de tensão, o isolamento do motor deve ser dimensionado para suportar até o dobro da tensão nominal (linha). Normalmente o aumento das perdas e o aumento do sistema de isolação implicam na prática numa redução das características nominais do motor de aproximadamente 12%. Isto quer dizer que, estamos usando um motor com o tamanho físico de um com 12% a mais de potência. Outra maneira de especificar seria, se temos um motor padrão para 80K de elevação, para ficar no mesmo tamanho com alimentação por inversor de frequência deveremos especificar elevação de 105K.

11.1.5 Partida com Reostato para Motores de Anéis

O motor de indução de anéis (rotor bobinado) pode ter uma família de curvas, conjugado x velocidade, através da inserção de resistências externas no circuito rotórico. Desta maneira, para uma dada velocidade, é possível fazer o motor fornecer qualquer valor de conjugado, até o limite do conjugado máximo. Assim é possível fazer com que o motor tenha altos conjugados na partida com correntes relativamente baixas (até a corrente do conjugado máximo), bem como fazê-lo funcionar numa dada velocidade com o valor de conjugado desejado. Em cada uma das curvas da família de curvas, o motor comporta-se de maneira que à medida que a carga aumenta, a rotação cai gradativamente. À velocidade síncrona, o conjugado motor torna-se igual a zero.

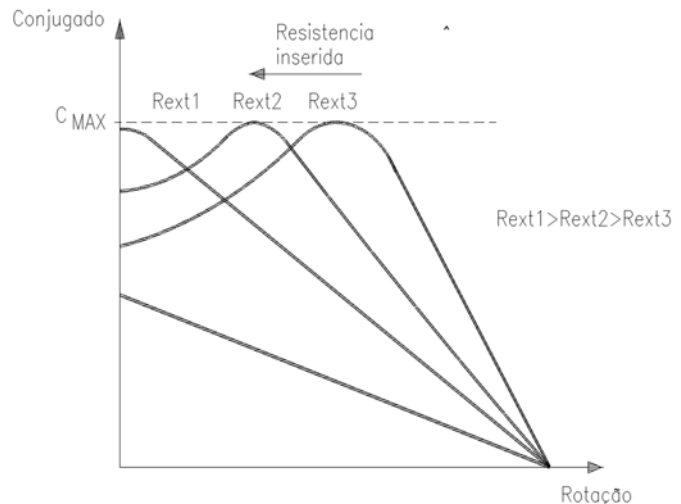



Figura 11.9: Família de curvas de conjugado x velocidade para motores de anéis.

A utilização de motores de anéis baseia-se na seguinte equação:

$$s = \frac{3\,R_2 * I_2^2}{\omega_0 * T} = \frac{p_{j2}}{\omega_0 * T}$$

Onde: s = escorregamento;
$R2$ = resistência rotórica;
$I2$ = corrente rotórica (A);
$\omega 0$ = rotação síncrona (rd/s);
T = torque ou conjugado do rotor (Nm);
$Pj2$ = perdas no rotor (W).

A inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o escorregamento "s", provocando a variação de velocidade. Na Figura 11.9, vemos o efeito do aumento da resistência externa inserida ao rotor.
No caso do uso de reostato líquido, o comportamento da curva de torque se dá de maneira linear.

11.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE PARTIDA

Tabela 11.1: Métodos de partida

Partida	Controle	Vantagem	Desvantagem
Chave Compensadora Ou Auto - Transformador	Tensão	▪ Limitação da corrente de partida. ▪ Baixo custo. ▪ Muito utilizada para cargas de baixa inércia.	▪ Há uma queda também do conjugado, o que pode acarretar problemas na partida se esta não for considerada. ▪ Mudança brusca nos TAPs, causando transitórios nos chaveamentos. ▪ Inadequado para cargas com altas inércias. ▪ Vida útil limitada (número de manobras). ▪ Possibilidade de gerar faíscas ou arcos de tensão devido as chaves serem mecânicas.
Soft-Starter Ou Partida Estática (Eletrônica)	Tensão	▪ Limitação da corrente de partida. ▪ Partida suave (existe uma rampa controlada de tensão por meio de tiristores). ▪ Vida útil elevada (não possui desgastes mecânicos por número de manobras).	▪ Preço devido ao uso de componentes eletrônicos em alta e média tensão. ▪ Problemas para cargas com altas inércias e conjugado constante.
Inversor de Frequência Ou Variador de Frequência	Tensão e Frequência	▪ Limitação da corrente de partida (próxima a nominal). ▪ Acionamento de cargas com altas inércias. ▪ Controle de velocidade do motor. ▪ Opera acima da rotação nominal do motor.	▪ Preço elevado. ▪ Motor deve ter isolamento adequado (a operação do inversor gera picos de tensão no isolamento do motor). ▪ Harmônicas, geram aquecimento adicional. ▪ Podem ser usados filtros para reduzir ou eliminar os efeitos prejudiciais do inversor ao motor, entretanto o custo deles é muito alto.
Direta	-	▪ Melhor condição para o motor. ▪ É a condição que causa o menor aquecimento.	▪ Pior condição para a rede de alimentação. ▪ Pior condição em termos de solicitações mecânicas.

12 CARACTERÍSTICAS DE ACELERAÇÃO

12.1 POTÊNCIA NOMINAL

Quando se deseja escolher um motor para acionar uma determinada carga, é preciso conhecer o conjugado requerido pela carga, a rotação que esta carga deve ter em condições nominais e as condições de operação. Conhecendo-se também o tipo de acoplamento é possível saber qual é a rotação nominal do motor. Portanto a potência nominal do motor é dada pela seguinte expressão:

$$P_n = \frac{2 . \pi . n . C_n}{60}$$

Ou: $P_n = 0{,}10472 \ .n.Cn = \dfrac{n . C_n}{9{,}5493}$

Onde: P_n = potência nominal do motor em Watt;
C_n= conjugado nominal do motor em Nm;
n = rotação nominal do motor em r.p.m.

Na equação da potência acima, considerou-se que o conjugado requerido pela carga é igual ao conjugado nominal do motor. Esta consideração só é verdadeira para acoplamento direto.
Quando o acoplamento for com redução de velocidade, o conjugado requerido pela carga deve ser referido ao eixo do motor, da seguinte maneira:

$$C_n = \frac{1}{\eta_{ac}} . \frac{n_c}{n_m} . C_{cn}$$

Onde: n_c = rotação da carga;
C_{cn} = conjugado nominal da carga em Nm;
η_{ac} = rendimento do acoplamento;
n_m = rotação do motor.

O rendimento do acoplamento é definido por:

$$\eta_{ac} = \frac{P_c}{P_a}$$

Onde: P_c = potência transmitida à carga;
P_a = potência total fornecida pelo motor, ou potência do eixo do motor.

Na Tabela 12.1, podemos observar o rendimento de alguns tipos de acoplamentos mais utilizados.

Tabela 12.1: Faixa de rendimentos para alguns tipos de acoplamentos

Tipo de acoplamento	Faixa de rendimento (%)
Direto	100
Embreagem eletromagnética	87 - 98
Polia com correia plana	95 - 98
Polia com correia em "v"	97 - 99
Engrenagem	96 - 99
Roda dentada (correia)	97 - 98
Cardã	25 - 100
Acoplamento hidráulico	100

12.2 CONJUGADO RESISTENTE DA CARGA

É o conjugado requerido pela carga, e portanto, depende do tipo de carga a ser acionada pelo motor. Porém todos podem ser representados pela expressão:

$$C_c = C_0 + k_c . n^x$$

Onde: C_c = conjugado resistente da carga em Nm;
C_0 = conjugado da carga para rotação zero (ou de partida) em Nm;
k_c = constante que depende da carga;
n = rotação nominal do motor em r.p.m.
x = parâmetro que depende da carga, pode assumir os valores - 1, 0, 1, 2.

De acordo com a equação acima, percebe-se que, o conjugado da carga varia com a rotação "n". Esta variação depende do parâmetro "x", desta forma, as cargas podem ser classificadas em quatro grupos:

1. Conjugado Constante:
Para este tipo de carga o parâmetro x é zero (x = 0), portanto:

$C_c = (C_0 + k_c)$ = Constante

Nas máquinas deste tipo, o conjugado resistente (C_c) permanece constante durante a variação de velocidade e a potência consumida pela carga (P_c) aumenta proporcionalmente com a velocidade.

Logo: $P_c = (C_0 + k_c) . n$

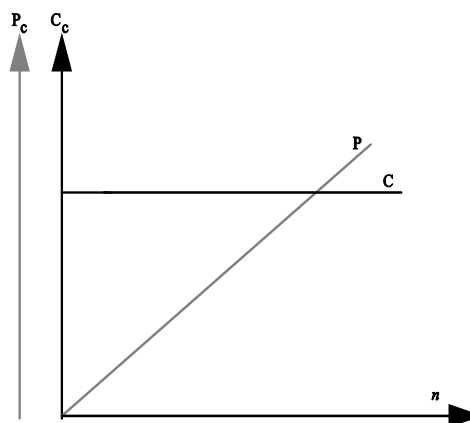



Figura 12.1: Conjugado constante

Exemplos de cargas com conjugados constantes:
- Compressores a pistão;
- Talhas;
- Guindastes;
- Bombas a pistão;
- Britadores;
- Transportadores contínuos.

2. Conjugado Linear:

Neste grupo o parâmetro x é igual a 1, então:

$$C_c = C_0 + k_c \cdot n$$ = Linear

Nestes tipos de máquinas o conjugado varia linearmente com a rotação e a potência com o quadrado da rotação.

Portanto: $P_c = \frac{C_o . n + K_c}{2 \ . n^2}$

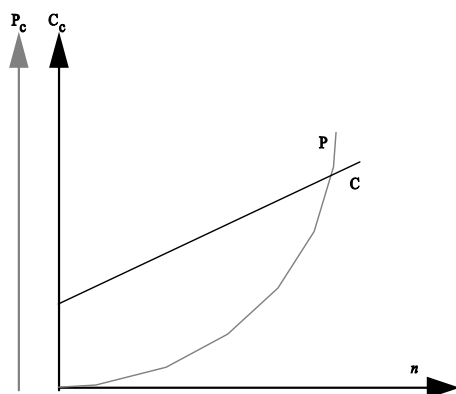



Figura 12.2: Conjugado linear.

Exemplos de cargas com conjugado linear (aplicação muito rara):

- Calandra com atrito viscoso (calandrar papel);
- Centrífuga;
- Bombas de vácuo.

3. Conjugado Quadrático:

Neste caso temos x=2 e o conjugado é dado por:

$$C_c = C_0 + k_c \cdot n^2$$ = Parabólico

Neste caso o conjugado varia com o quadrado da rotação e a potência com o cubo da rotação.

Logo: $P_c = \frac{C_o . n + K_c}{3 . n^3}$

Exemplos de cargas com conjugado quadrático:

- Bombas centrífugas;
- Ventiladores;
- Compressores centrífugos;
- Misturadores centrífugos.

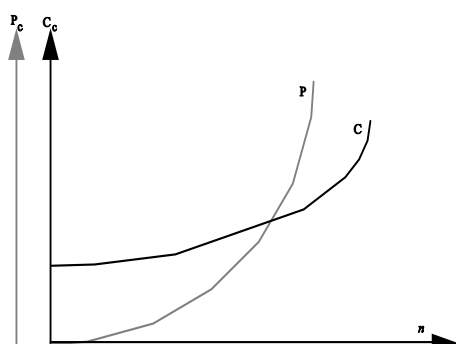



Figura 12.3: Conjugado quadrático

4. Conjugado Hiperbólico:

Neste caso temos x = -1, e o conjugado é dado por:

$$C_c = \frac{K_c}{n}$$ = Hiperbólico

Neste tipo de carga a constante C0 pode ser considerada nula. Pela expressão acima percebe-se que para n = 0 o conjugado seria infinito, o que não tem sentido físico. Este fato na prática não acontece porque a rotação da máquina só pode variar entre um limite mínimo (n1) e máximo (n2). Adicionalmente, dentro deste intervalo a curva hiperbólica representa bem o comportamento da carga. Para rotações abaixo e acima destes valores, o comportamento pode variar.

A potência neste caso permanece constante, isto é, não varia com a rotação, ou seja:

$P_C = K_C$ = Constante

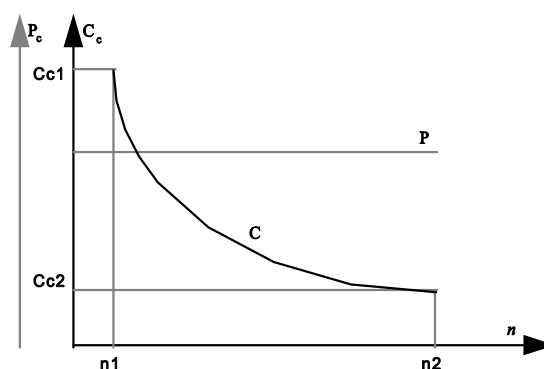



Figura 12.4: Conjugado hiperbólico.

Exemplos de cargas com conjugado hiperbólico:

- Bobinadeira de papel;
- Bobinadeira de pano;
- Descascador de toras;
- Tornos (análise feita com conjugado constante, com elevado número de manobras em geral motores dupla velocidade);
- Bobinadeiras de fios.

5. Conjugados Não Definidos:

Neste caso não se aplica a equação completa para conjugado resistente da carga, pois não podemos determinar sua equação de maneira precisa, logo temos que determinar o seu conjugado utilizando técnicas de integração gráfica. Na prática, analisa-se como conjugado constante, pelo máximo valor de torque absorvido.

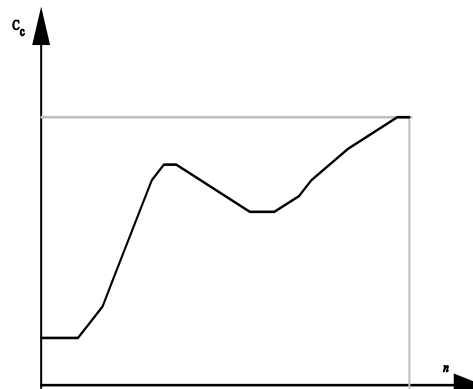



Figura 12.5: Conjugado não definido

12.3 INÉRCIA DA CARGA

O momento da inércia (ou "J") da carga acionada é uma das características fundamentais para verificar, através do tempo de aceleração, se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante. Momento da inércia é uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. Depende do eixo em torno do qual ele está girando e, também, da forma do corpo e da maneira como sua massa está distribuída. A unidade do momento de inércia é kgm2 (no S.I.). O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia da carga e do motor (JT=JM+JC). No caso de uma máquina que tem a "rotação diferente da rotação do motor" (por exemplo, nos casos de acionamento por polias ou engrenagens), a inércia da carga deverá ser referida à rotação nominal do motor como mostra a Figura 12.6:

Momento de inércia em rotações diferentes

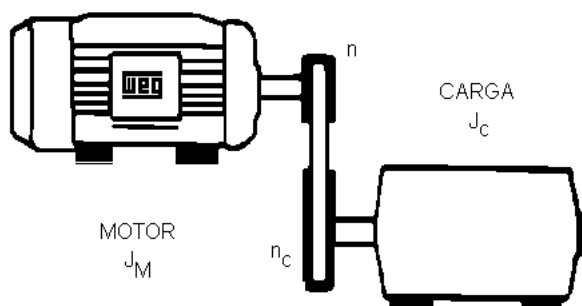



Figura 12.6: Momento de inércia em rotações diferentes

$$J_{ce} = J_c \cdot \left(\frac{n_c}{n_m}\right)^2 \quad [kgm^2]$$

Onde: J_{ce} = momento de inércia da carga referido ao eixo do motor;
J_c = momento de inércia da carga;
n_c = rotação da carga;
n_m = rotação nominal do motor.

Obs.:
Uma grandeza muito usada para medir o momento de inércia é o ***"Momento de Impulsão"***, conhecido como GD² da carga, que pode ser expresso em kgm² ou ainda kgfm² (1 kgm² = 9,81 kgfm²). Sua relação com o momento de inércia é dado por: J=GD²/4.

12.4 CONJUGADO MÉDIO DA CARGA

Conhecendo-se a curva do conjugado da carga é possível se determinar o conjugado médio. O conhecimento do conjugado médio é importante no cálculo do tempo de aceleração.

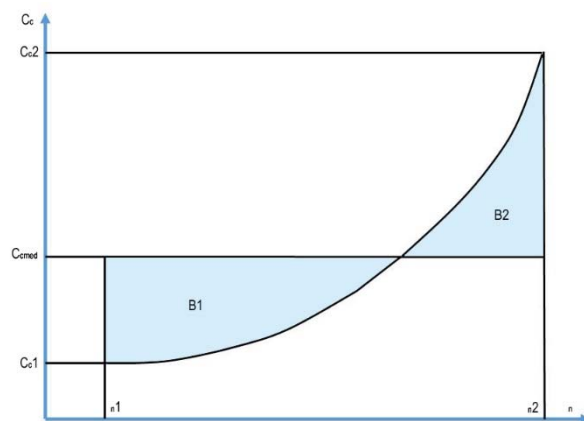



Figura 12.7: Curva de conjugado nominal e médio de uma carga típica.

O conjugado médio da carga pode ser obtido graficamente, bastando que se observe que a área B1 seja igual a área B2.

12.5 CONJUGADO E ROTAÇÃO DO MOTOR

Conforme foi explicado no capítulo 2, o motor de indução tem conjugado igual a zero na rotação síncrona. À medida que a carga vai aumentando, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver nesta rotação. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor. Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal, vamos obter uma curva com aspecto representado na Figura 12.8.
Na curva abaixo destacamos e definimos alguns pontos importantes. Os valores dos conjugados relativos a estes pontos são especificados pela norma NBR 17094 da ABNT, e são apresentados a seguir:

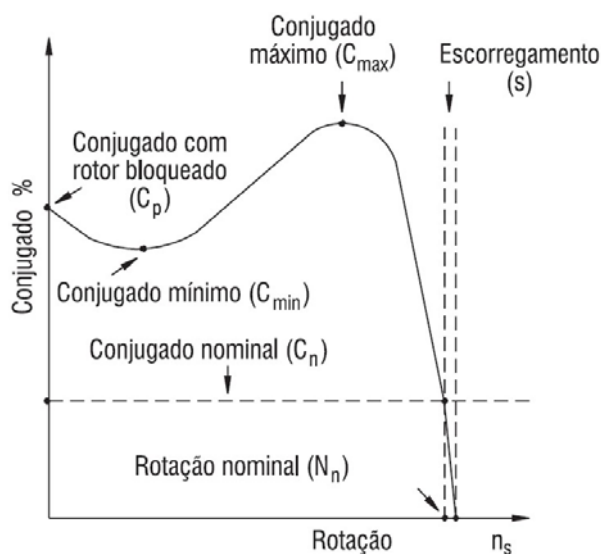



Figura 12.8: Curva de Conjugado x Rotação

- C_o (Conjugado básico) - é o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona.

$$C_0\,(kgfm) = \frac{716 \cdot P\,(cv)}{n_s\,(rpm)} = \frac{974 \cdot P\,(kW)}{n_s\,(rpm)}$$

$$C_0\,(Nm) = \frac{7094 \cdot P\,(cv)}{n_s\,(rpm)} = \frac{9550 \cdot P\,(kW)}{n_s\,(rpm)}$$

- C_n (Conjugado nominal ou de plena carga) - é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

- C_P (Conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida ou, ainda, conjugado de arranque) - é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor com o rotor bloqueado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequência nominais. Ainda, esta definição leva em conta o fato de que o conjugado com o rotor bloqueado pode variar um pouco conforme a posição em que se trava o motor.

O conjugado *de partida pode ser expresso em Nm ou, mais comumente, em porcentagem do conjugado nominal.*

$$C_P\,(\%) = \frac{C_P\,(Nm)}{C_n\,(Nm)} \cdot 100$$

Na prática, o conjugado do rotor bloqueado deve ser o mais alto possível, para que o rotor possa vencer a inércia inicial da carga e possa acelerá-la rapidamente, principalmente quando a partida é com tensão reduzida.

- C_{min} (Conjugado mínimo) - é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo. Na prática, este valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida.

- $C_{máx}$ (Conjugado máximo) - é o maior conjugado desenvolvido pelo motor sob tensão e frequências nominais, sem queda brusca de velocidade. É a máxima sobrecarga que o motor suporta quando este está trabalhando nas condições nominais. Na prática, o conjugado máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais:
  1. O motor deve ser capaz de vencer, sem grandes dificuldades, eventuais picos de carga, como pode acontecer em certas aplicações, como em britadores, calandras, misturadores e outras;
  2. O motor não deve arriar, isto é, perder bruscamente a velocidade, quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente, excessivas.

12.6 CATEGORIAS - VALORES MÍNIMOS NORMALIZADOS

Conforme as suas características de conjugado, em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola, são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas na norma NBR 17094, e são as seguintes:

Categoria N
Conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores, etc.
Válido para partida direta na rede, com 4, 6 ou 8 polos, e de com potência de 0,4 a 160 kW na frequência de 60 Hz.

Categoria H
Conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, alguns tipos de ventiladores, etc.

Categoria D (Somente para norma NBR 17094, IEC 60034-12 não contempla)
Conjugado de partida alto, corrente de partida normal e alto escorregamento (maior que 5%). Usados em excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugado de partida muito alto e corrente de partida limitada.
Este tipo de categoria não se aplica para motores com potência acima de 110kW, porque tecnicamente há grande dificuldade de se obter o escorregamento.
As curvas de conjugado x velocidade das diferentes categorias podem ser vistas na Figura 12.9.

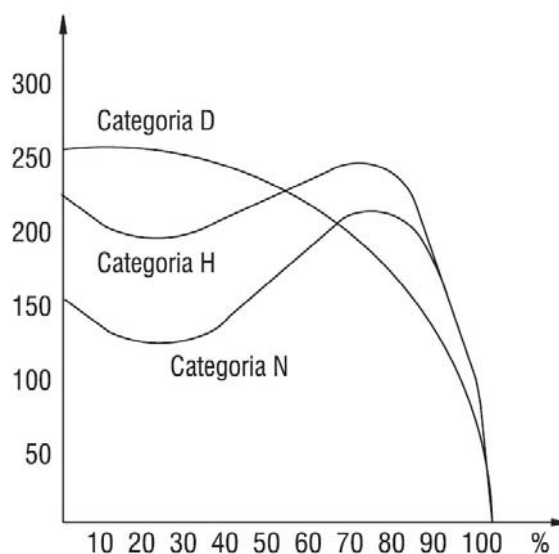



Figura 12.9: Curvas Conjugado x Velocidade das diferentes categorias.

As normas vigentes trazem alguns valores de conjugados de partida, mínimo e máximo. Os motores de alta tensão WEG possuem estes conjugados sempre acima do mínimo exigido pelas normas. Os valores dos conjugado

máximo e de partida encontram-se listados nos catálogos das linhas padronizadas de motores da WEG.

12.7 TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO (t_{rb})

Tempo de rotor bloqueado é o tempo máximo de partida, ou seja, é o tempo pelo qual os fabricantes de motores elétricos garantem que a temperatura limite da isolação dos enrolamentos não será ultrapassada, quando estes forem percorridos pela corrente de partida.
Este tempo é um parâmetro que depende do projeto da máquina.
Encontra-se normalmente no catálogo ou na folha de dados do fabricante. Normalmente os valores apresentados são de cálculo, somente em algumas aplicações especiais o valor é determinado.
Na prática este tempo é determinado da seguinte maneira:

- O rotor é bloqueado;
- Aplica-se a tensão e a frequência nominais;
- A elevação da temperatura é registrada em gráfico, através de um registrador, este conectado a sondas no rotor e estator, em pontos estratégicos.
- O ponto que mais rapidamente atingir a temperatura limite define o tempo de rotor bloqueado.

Tabela *12.2* mostra os valores limites da temperatura e do rotor bloqueado, de acordo com as normas NEMA e IEC.

Tabela 12.2: Limites de temperatura com rotor bloqueado.

CLASSE TÉRMICA	T_{mx}		$\Delta T_{máx}$
	NEMA MG1.12.53	IEC 60079-7	
B	175	185	80
F	200	210	105
H	225	235	125

Para partidas com tensão reduzida o tempo de rotor bloqueado pode ser corrigido como segue:

$$t_{rb}(V_R) = t_{rb}(V_n) \cdot \left(\frac{V_n}{V_R}\right)^2$$

Onde: $t_{rb}(V_R)$ = tempo de rotor bloqueado com tensão reduzida;
$t_{rb}(V_n)$ = tempo d e rotor bloqueado com tensão nominal;
V_n = tensão nominal;
V_R = tensão reduzida.

12.8 CONJUGADO MOTOR MÉDIO (C_{Mmed})

O conjugado mecânico no eixo do motor é dado pela expressão abaixo:

$$C_{Mmed} = \frac{3 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot s}$$

Onde: R_2 = resistência de fase do rotor em Ohm;
I_2 = corrente de fase do rotor em A;
S = escorregamento do motor em p.u.;
n_s = rotação síncrona.

A equação acima representa a curva de conjugado do motor, que após algumas simplificações pode ser representado pela expressão:

$$C_{Mmed} = \frac{A - B \cdot n}{C \cdot n^2 - D \cdot n + E}$$

Onde: $C_{Mméd}$ = conjugado motor em Nm
n = rotação do motor em rps
A,B,C,D,E = constantes positivas que dependem do projeto do motor.

O valor destas constantes dependem do estado de saturação magnética do núcleo do motor. Representando esta última equação em um gráfico, obtemos a curva característica do conjugado médio do motor, conforme abaixo:

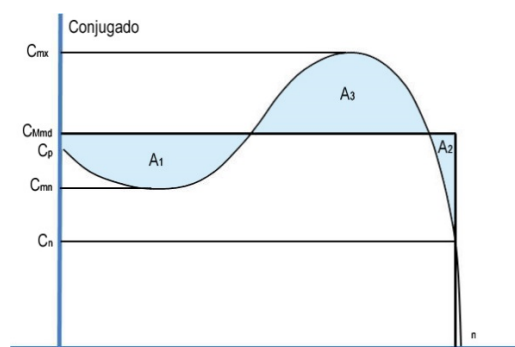



Figura 12.10: Conjugado motor médio.

Analiticamente o conjugado motor médio pode ser calculado pela integral:

$$C_{Mmed} = \frac{A - B \cdot n}{C \cdot n^2 - D \cdot n + E}$$

Como esta integral é muito difícil de ser resolvida analiticamente, na prática é feita a integração gráfica, ou numérica. Isto não é muito complicado, basta que se observe que a soma das áreas A1 e A2 sejam igual a área A3, como mostra a Figura 12.10.
Usualmente temos:

a) Para motores com categorias N e H

$$C_{Mmed} = 0{,}45 \cdot \left[\left(\frac{C_p}{C_n}\right)\right] + \left[\left(\frac{C_m}{C_n}\right)\right] \cdot C_n$$

b) Para motores com categoria D:

$$C_{Mmed} = 0{,}6 \cdot \left[\left(\frac{C_p}{C_n}\right)\right] \cdot C_n$$

Quando o conjugado nominal (C_n) é dado em kgfm, basta multiplicar pela aceleração da gravidade (9,81 m/s²) para obtermos em Nm.

12.9 TEMPO DE ACELERAÇÃO

Tempo de aceleração é o tempo que o motor leva para acionar a carga desde a rotação zero até a rotação nominal.
O cálculo do tempo de aceleração permite verificar se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pela estabilidade térmica do material isolante, e que não ultrapasse o limite de ruptura das barras ou da solda do rotor (entre barras e anel de curto circuito). O tempo de aceleração também é um parâmetro útil para dimensionar o equipamento de partida e o sistema de proteção.
O tempo de aceleração deve ser menor que o tempo do rotor bloqueado (ou máximo tempo permitido de aceleração).
Para um movimento de rotação é válida a relação:

$$C_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Onde: C_a = conjugado acelerador em Nm;
J = momento de inércia do corpo em kgm²;
ω = velocidade angular em rad/s.

A velocidade angular pode ser calculada por:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

O conjunto médio de aceleração obtém-se a partir da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga. Seu valor deveria ser calculado para cada intervalo de rotação (a somatória dos intervalos forneceria o tempo total de aceleração).

Porém, na prática, é suficiente que se calcule graficamente o conjugado médio, isto é, a diferença entre a média do conjugado do motor e a média do conjugado da carga.
Esta média pode ser obtida, bastando que se observe que a soma das áreas A1 e A2 seja igual a área A3 e que a área B1 seja igual a área B2, como mostra a Figura 12.11.

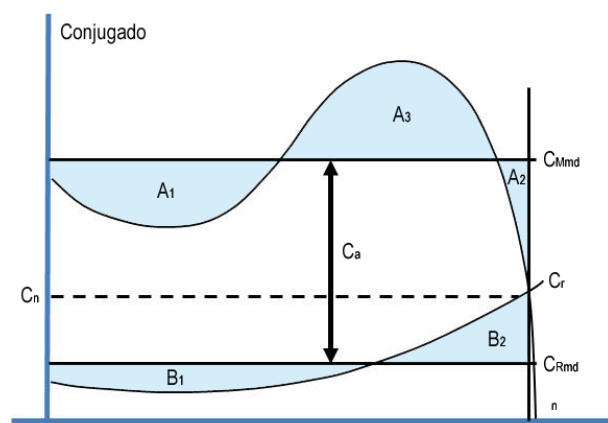



Figura 12.11: Determinação gráfica do conjugado médio de aceleração.

O conjugado acelerador pode ser substituído sem perda de precisão pelo conjugado acelerador médio dado por:

$$C_{amed} = C_{Mmed} - C_{Rmed}$$

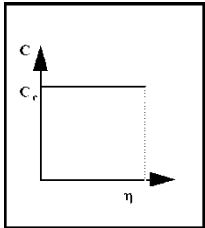
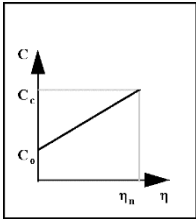
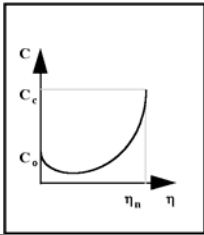
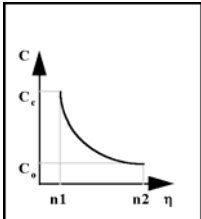
Como: $C_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$

Temos: $C_{Mmed} - C_{Rmed} = (J_m - J_{ce}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{dn}{dt}$

Portanto: $dt = 2 \cdot \pi \cdot \frac{J_m + J_{ce}}{C_{Mmed} - C_{Rmed}} \cdot dn$

Integrando esta última equação, resulta:

$$t_a = \frac{\pi \cdot n_m}{30} \cdot \left(\frac{J_m + J_{ce}}{C_{Mmed} - C_{Rmed}} \right)$$

Onde: t_a = tempo de aceleração em segundos;
n_m = rotação nominal do motor em rpm;
J_m = momento de inércia do motor em kgm2;
J_{ce} = inércia da carga referida ao eixo do motor em kgm2;
C_{Mmed} = conjugado motor médio em Nm;
C_{Mmed} = conjugado resistente médio em Nm.

12.10 POTÊNCIA DINÂMICA OU DE ACELERAÇÃO

O tempo de aceleração sempre deve ser menor ou igual ao tempo de rotor bloqueado do motor. A potência dinâmica é a potência necessária para acelerar a carga até a rotação nominal em um intervalo de tempo menor ou igual ao tempo de rotor bloqueado.
Esta potência, na medida do possível, deve ser igual à potência nominal do motor (motor não sobredimensionado). Porém, dependendo das características da carga (inércia e conjugado), a potência dinâmica pode assumir valores maiores que a potência nominal ou há necessidade de sobredimensionar o motor (potência dinâmica para acelerar o motor é maior que a potência necessária em regime), de outra forma, o motor/acionamento poderá não ser apto a acelerar a carga.
Nestes casos deverá ser feito um estudo técnico-econômico, para ver se é possível utilizar um acoplamento hidráulico, eletromagnético ou de fricção (embreagem).
Dependendo do estudo técnico-econômico pode tornar-se evidente que a melhor solução seria um outro tipo de motor, por exemplo, um motor de anéis ou motor de gaiola acionado por inversor de frequência.

Tabela 12.3: Tempo de aceleração para motores de indução

TEMPO DE ACELERAÇÃO - MOTOR DE INDUÇÃO					
Conjugado Resistente da carga		Constante	Linear	Parabólico	Hiperbólico
Curva: Conjugado x Rotação					
Exemplos de aplicação		▪ Compressor à pistão ▪ Talha ▪ Bomba à pistão ▪ Britador ▪ Transportador contínuo	▪ Calandra ▪ Centrífuga ▪ Bomba de vácuo	▪ Bomba centrífuga ▪ Ventilador ▪ Misturador centrífugo ▪ Compressor centrífugo	▪ Bobinadeira de fios, panos e papel ▪ Descascador de toras ▪ Torno
Categoria do motor acionador		N / H	N / H	N	Inversor de Frequência no enfraquecimento
Conjugado médio de carga (C_{Cmed})		C_{Cn}	$\frac{C_0 + C_{Cn}}{2}$	$\frac{2 . C_0 + C_{Cn}}{3}$	$\frac{C_{Cn} - n_2}{n_2 - n_1} . \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$
Momento de inércia da carga referida ao motor (J_{ce})		$J_{ce} = J_c \cdot \left(\frac{n_c}{n_m}\right)^2$			
Relação de transmissão (R)		$R = \frac{n_c}{n_m}$			
Conjugado resistente médio (C_{Rmed})		$C_{Rmed} = R . C_{Cmed}$			
Conjugado motor médio	N/H	$C_{Mmed} = 0{,}45 \cdot \left[\left(\frac{C_p}{C_n}\right)\right] + \left[\left(\frac{C_m}{C_n}\right)\right] \cdot C_n$			
	D	$C_{Mmed} = 0{,}6 \cdot \left[\left(\frac{C_p}{C_n}\right)\right] \cdot C_n$			
Tempo de aceleração		$t_a = \frac{\pi . n_m}{30} . \left(\frac{J_m + J_{ce}}{C_{Mmed} - C_{Rmed}}\right)$			
Unidades		J = momento de inércia (kgm²) C = conjugado (Nm)	n = rotação (rpm) t = tempo (s)		

12.11 REGIME DE PARTIDA

Devido ao valor elevado da corrente de partida dos motores de indução, o tempo gasto na aceleração de cargas de uma inércia apreciável (elevada) resulta na elevação rápida da temperatura do motor. Se o intervalo entre partidas sucessivas for muito reduzido, isto levará a uma elevação de temperatura excessiva nos enrolamentos, danificando-os ou reduzindo sua vida útil. A norma NBR 7094 estabelece um regime de partida mínimo que os motores devem ser capazes de realizar:
Duas partidas sucessivas, sendo a primeira feita com o motor frio, isto é, com seus enrolamentos à temperatura ambiente e a segunda logo a seguir, porém, após o motor ter desacelerado até o repouso;
Uma partida com o motor quente, ou seja, com os enrolamentos à temperatura de regime.
A primeira condição simula o caso em que a primeira partida do motor é malograda, por exemplo, pelo desligamento da proteção, permitindo-se uma segunda tentativa logo a seguir. A segunda condição simula o caso de um desligamento acidental do motor em funcionamento normal, por exemplo, por falta de energia na rede, permitindo-se retomar o funcionamento logo após o restabelecimento da energia.

12.12 CORRENTE DE ROTOR BLOQUEADO

12.12.1 Valores Máximos Normalizados

Os limites máximos da corrente com rotor bloqueado, em função da potência nominal do motor são definidos por norma, sendo aplicáveis à motores de qualquer polaridade. Estes valores máximos estão indicados na Tabela 12.4, expressos em termos da potência aparente absorvida com rotor bloqueado em relação à potência nominal, kVA/cv ou kVA/kW.

$$\frac{kVA}{cv} = \frac{Potància\ \ aparente\ \ com\ rotor\ \ bloqueado}{Potància\ \ nominal}$$

$$\frac{kVA}{cv} = \frac{\sqrt{3}\,.\,I_P\,.\,V}{P(cv)\ \ .\,1000}\ ;\qquad \frac{kVA}{kW} = \frac{\sqrt{3}\,.\,I_P\,.\,V}{P(kW)\ \ .\,1000}$$

$$\frac{kVA}{cv} = \frac{I_P}{I_n}\cdot\frac{0{,}736}{\eta\,.\cos_{phi}}$$

Onde: I_P = Corrente de rotor bloqueado, ou corrente de partida;
V = Tensão nominal (V);
P = Potência nominal (cv ou kW).
A relação entre a os valores em kVa/cv e I_P/I_N pode ser descrita conforme equação a seguir:

Tabela 12.4: Potência aparente com rotor bloqueado (S_P/P_n) para motores trifásicos.

FAIXA DE POTÊNCIAS NOMINAIS		S_P / P_n	
cv	kW	kVA / cv	kVA / kW
>34≤140	>25≤100	8,1	11
>140≤860	>100≤630	7,4	10

12.12.2 Indicação da Corrente ou Letra Código

A indicação do valor da corrente de rotor bloqueado na placa de identificação do motor é prescrita na norma NBR 17094, de maneira mais direta que na norma antiga EB-120. De acordo com EB-120, a placa mostrava uma letra código padronizada que dava a indicação da faixa de valores kVA/cv em que se situava a corrente de rotor bloqueado do motor. Os valores correspondentes a essas letras do código de partida, são mostradas na Tabela 12.5. Pela norma NBR 17094, indica-se diretamente o valor de IP/In, que é a relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal.
Na norma MG 1 (PART 10, PAGE 8 item 10.32.2 apresenta a mesma tabela que relaciona corrente de partida, rendimento e fator de potência. Nesta norma a designação com o nome de CODE LETTER é expressa em kVA/HP.

Tabela 12.5: Códigos de partida

Código	kVA / cv	Código	kVA / cv
A	0 - 3,14	L	9,0 - 9,99
B	3,15 - 3,54	M	10,0 - 11,09
C	3,55 - 3,99	N	11,2 - 12,49
D	4,0 - 4,49	P	12,5 - 13,99
E	4,5 - 4,99	R	14,0 - 15,99
F	5,0 - 5,59	S	16,0 - 17,99
G	5,6 - 6,29	T	18,0 - 19,09
H	6,3 - 7,09	U	20,0 - 22,09
J	7,1 - 7,99	V	22,4 ou mais
K	8,0 - 8,99		

13 SELEÇÃO E APLICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS ASSÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE ALTA TENSÃO

Na engenharia de aplicação de motores é comum e, em muitos casos práticos, comparar as exigências da carga com as características do motor.
Existem muitas aplicações que podem ser corretamente acionadas por mais de um tipo de motor, e a seleção de um determinado tipo, nem sempre exclui o uso de outros tipos.
Com o advento do computador, o cálculo pode ser aprimorado, obtendo-se resultados precisos que resultam em máquinas dimensionadas de maneira mais econômica.
Os motores de indução Weg, de gaiola ou de anel, de baixa e alta tensão, encontram vasto campo de aplicação, notadamente nos setores de siderúrgica, mineração, papel e celulose, saneamento, químico e petroquímico, cimento entre outros, tornando-se cada vez mais importante a seleção do tipo adequado para cada aplicação.
A seleção do motor adequado, com respeito ao tipo, conjugado, fator de potência, rendimento, elevação de temperatura, isolação, tensão e grau de proteção mecânica, somente pode ser feita, após uma análise cuidadosa, considerando parâmetros como: custo inicial, capacidade de rede, necessidade da correção do fator de potência, conjugados requeridos, efeito da inércia da carga, necessidade ou não de regulação de velocidade, exposição da máquina em ambientes úmidos, poluídos e/ou agressivos.
O motor assíncrono de gaiola é o mais empregado em qualquer aplicação industrial, devido a sua construção robusta e simples, além de ser a solução mais econômica, tanto em termos de motores quanto de comando e proteção.
Na seleção correta dos motores, é importante considerar as características técnicas de aplicação e as características de carga, no que se refere a aspectos mecânicos para calcular:

a) Conjugado de partida
Conjugado requerido para vencer a inércia estática da máquina e produzir movimento. Para que uma carga, partindo da velocidade zero, atinja a sua velocidade nominal, é necessário que o conjugado do motor seja sempre superior ao conjugado da carga.

Tabela 13.1: Comparação entre motor de indução com rotor gaiola e de rotor bobinado ou anéis

PROJETO	TIPO	
	Motor de Indução de Gaiola Rotor de Gaiola	Motor de Indução de Anéis Rotor Bobinado
Conjugado de partida	Baixo	Alto
Corrente de partida/ corrente nominal	Alta	Baixa
Conjugado máximo	> 160% do conjugado nominal	> 180% do conjugado nominal
Rendimento	Alto	Alto
Equipamento de partida	Simples para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de proteção	Simples	Simples
Espaço requerido	Pequeno	Reostato requer um espaço grande
Manutenção	Pequeno	Nos anéis e escovas, sistema de levantamento
Custo	Baixo	Alto

b) Conjugado de aceleração
Conjugado necessário para acelerar a carga à velocidade nominal. O conjugado do motor deve ser sempre maior que o conjugado de carga, em todos os pontos entre zero e a rotação nominal. No ponto de interseção das duas curvas, o conjugado de aceleração é nulo, ou seja, é atingido o ponto de equilíbrio a partir do qual a velocidade permanece constante. Este ponto de interseção entre as duas curvas deve corresponder a velocidade nominal.

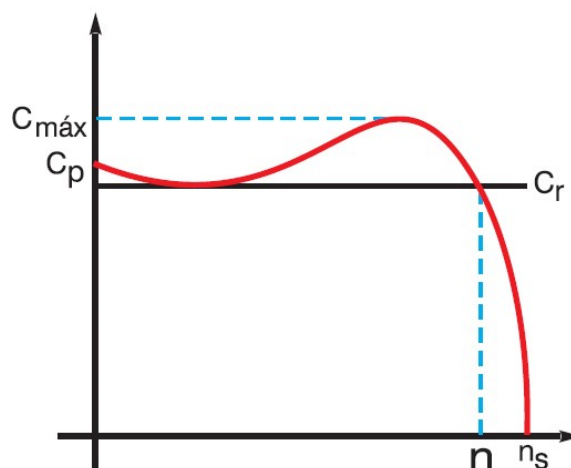
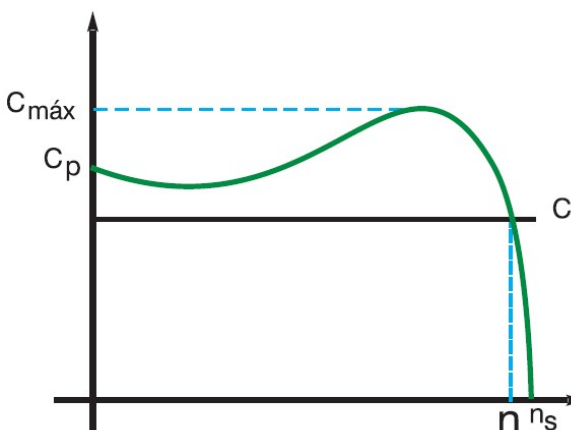



Figura 13.1: Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga.

Onde: $Cmáx$ = conjugado máximo;
C_P = conjugado de partida;
C_r = conjugado resistente;
ns = rotação síncrona;
n = rotação nominal.

O conjugado de aceleração assume valores bastante diferentes para cada intervalo de rotação na fase de partida. O conjugado médio de aceleração (Ca) obtém-se a partir da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga (ver capítulo 10).

c) Conjugado nominal
Conjugado nominal é o conjugado desenvolvido por um motor para as condições nominais de frequência e tensão.
O conjugado nominal de uma carga é o solicitado pela carga, no eixo do motor, necessário para mover a carga em condições de funcionamento à velocidade específica.
O conjugado requerido para funcionamento de uma máquina pode ser constante ou variar entre amplos limites. Para conjugados variáveis, o conjugado máximo deve ser suficiente (maior ou igual) para suportar picos momentâneos de carga. As características de funcionamento de uma máquina, quanto ao conjugado, podem dividir-se em três classes, a saber, conjugado constante, conjugado variável e potência constante (ver capítulo 10).

Para correta especificação do motor, são necessárias as seguintes informações na consulta:

1. Características da rede de alimentação:

- Tensão de alimentação do motor (e dos aquecedores internos, quando necessários);
- Frequência nominal em Hz;
- Método de partida (quando esta informação não for fornecida, será considerado partida direta).

2. Características do ambiente:

- Altitude;
- Temperatura ambiente;
- Atmosfera do ambiente.

3. Características construtivas:

- Forma construtiva;
- Potência em kW e velocidade em rpm;
- Fator de serviço;
- Sentido de rotação (horário, anti-horário ou ambos, olhando para ponta de eixo principal).

4. Características da carga:

- Momento de inércia da máquina acionada e a que rotação está referida (ao eixo do motor ou da carga);
- Curva de conjugado resistente da carga;
- Dados de transmissão (acoplamento);
- Cargas axiais e seu sentido, quando existentes;
- Cargas radiais e seu sentido quando existentes;
- Regime de funcionamento da carga (número de partidas/horas).

Em resumo, a correta seleção do motor implica que o mesmo satisfaça às exigências requeridas pela aplicação específica.
Sob este aspecto o motor deve, basicamente, ser capaz de:

- Acelerar a carga com tempo suficientemente curto para que o aquecimento não venha a danificar as características físicas dos materiais isolantes e demais componentes;
- Funcionar no regime especificado sem que a temperatura de suas diversas partes ultrapasse a classe do isolante, ou que o ambiente possa vir a provocar a destruição do mesmo;
- Sob o ponto de vista econômico, funcionar com valores de rendimento e fator de potência dentro da faixa ótima para a qual foi projetado.

14 PROTEÇÃO E ACESSÓRIOS DE MOTORES ELÉTRICOS

Na filosofia da proteção a ser adotada para um determinado motor pesam o tamanho do motor, o nível de tensão da rede de alimentação, o método de partida, o impacto que uma falta no motor causará para o sistema de alimentação, o grau de necessidade da operação do motor em questão para o processo industrial em curso, a política de reposição de motores da empresa e considerações econômicas quanto ao custo da proteção em relação ao custo do motor e ao custo de uma paralisação no processo industrial.
Serão abordados a seguir alguns tipos de proteções frequentemente utilizadas em motores de alta tensão.

14.1 PROTEÇÃO DO ESTATOR

14.1.1 Proteção Contra Curtos-Circuitos

As correntes elevadas que ocorrem em um curto circuito tornam necessário isolar o motor afetado. Dependendo do porte e tensão de alimentação do motor, é usual a utilização de um relé instantâneo ajustado para uma corrente ligeiramente acima da corrente com rotor bloqueado, conjugado com um relé ajustado para 3 a 4 vezes a corrente nominal do motor com temporização suficiente para não operar durante a partida. Para motores de grande potência e alta tensão, a proteção contra curto-circuito é geralmente realizada por relés secundários.

14.1.2 Proteção Contra Surtos de Tensão - Supressão de Transientes

O nível de isolamento de máquinas girantes é muito menor que o de outros tipos de equipamentos elétricos. Tal nível para um transformador de 5kV imerso em óleo, por exemplo, é de 60kV, ao passo que para um motor de 4kV nominais é da ordem de 13kV. Esse nível é igual ao valor de pico da onda de tensão aplicada durante 1 minuto no "ensaio de tensão aplicada" (2 vezes a tensão nominal + 1kV).
Um enrolamento de máquina de corrente alternada pode ser considerado como uma pequena linha de transmissão, com reflexão e refração de onda nos terminais, impedância de surto, etc. A maior solicitação do ponto de vista da tensão de impulso geralmente ocorre nas primeiras espiras do enrolamento, pois o surto vai sendo atenuado ao longo do enrolamento. Motores elétricos têm impedância de surto na faixa de 150 a 1500 ohms. Tipicamente, na medida em que a tensão nominal e a potência nominal dos motores cresce, também cresce sua impedância de surto.
As fontes comuns de surtos de tensão são descargas atmosféricas na linha, operações de manobra (liga e desliga) e cargas de alta corrente no mesmo circuito. Nos surtos de manobra, a tensão geralmente não ultrapassa duas a três vezes a tensão fase-neutro do sistema. Embora as tensões de surto sejam altas, sua duração é muito pequena. Tipicamente, a onda se eleva muito depressa (1 a 10 microssegundos), atingindo então seu valor máximo ("crista" da onda), decrescendo então muito mais lentamente, atingindo 50% do seu valor máximo depois de 2 a 150 microssegundos.
A proteção de máquinas girantes contra surtos requer a limitação da tensão de impulso junto aos terminais da máquina e a diminuição da inclinação da frente de onda te tensão. A combinação dessas duas condições é denominada "achatamento da onda". Este achatamento da onda é obtido com a instalação de para-raios entre os terminais da máquina e a carcaça aterrada.
Quando mais de uma máquina estiver ligada a um barramento comum é usual ligar-se os para-raios entre cada fase e a terra, desde que as carcaças das máquinas estejam ligadas a uma malha de terra de baixa resistência e que seja a mesma dos para-raios.
A diminuição da inclinação da frente de onda é conseguida por capacitores em derivação ligados aos terminais da máquina.
O uso de capacitores e para-raios contra surtos na Weg Máquinas:
Para motores de 6.0kV e acima a Weg recomenda o seu uso.
Para motores com tensão acima de 11kV, os motores WEG Energia são sempre ofertados com para-raios e capacitores, porém fica sempre a critério do cliente a instalação ou não.

14.1.3 Proteção Diferencial

O sistema de proteção diferencial exige que os dois terminais de cada fase do motor sejam acessíveis. As maiores vantagens de um sistema de proteção diferencial são a alta sensibilidade, alta velocidade e o fato de operar somente sob faltas internas ao motor, não sendo sensível às sobrecorrentes durante a partida. Sistemas de proteção diferencial não exigem coordenação com outras proteções no sistema.
Os transformadores de corrente vão, via de regra, instalados na caixa de ligação do motor, o que implica que, quando se deseja utilizar este tipo de proteção, caixas de ligação maiores que as usuais são necessárias.

14.2 PROTEÇÃO TÉRMICA PARA MOTORES DE ALTA TENSÃO

A proteção térmica é efetuada por meio de termoresistências (resistência calibrada), termistores, termostatos ou protetores térmicos. Os tipos de detectores a serem utilizados são determinados em função da classe de temperatura do isolamento empregado, de cada tipo de máquina e da exigência do cliente. Vejamos a seguir alguns tipos de protetores mais utilizados pelo mercado de motores de alta tensão.

14.2.1Termoresistores

Esses tipos de detectores, usualmente conhecidos como "RTD" – “Resistence Temperature Dependent” ou Resistência Calibrada - são elementos onde sua operação é baseada na característica de variação da resistência com a temperatura, intrínseca a alguns materiais (geralmente platina, níquel ou cobre). Consistem em uma resistência calibrada, que possui como característica uma dependência linear entre a resistividade do material do sensor e a temperatura a que está submetido.
Isto possibilita um acompanhamento contínuo do processo de aquecimento do motor pelo display do controlador, com alto grau de precisão e sensibilidade de resposta.

Sua aplicação é ampla nos diversos setores da técnica de medição e automatização de temperatura nas indústrias em geral. Geralmente, aplica-se em instalações de grande responsabilidade como, por exemplo, em regime intermitente muito irregular. Um mesmo detector pode servir para alarme e para desligamento.
Os RTD's mais comuns são denominados "de platina" e de "cobre", que tem suas resistências a 0ºC respectivamente de 100 e 10 Ohms. A utilização de RTD's para motores, especialmente no Brasil, tem sido até o momento feita em maior número com os "de platina" ou Pt100.

Figura 14.1 - Detector de temperatura em mancal de Bucha.

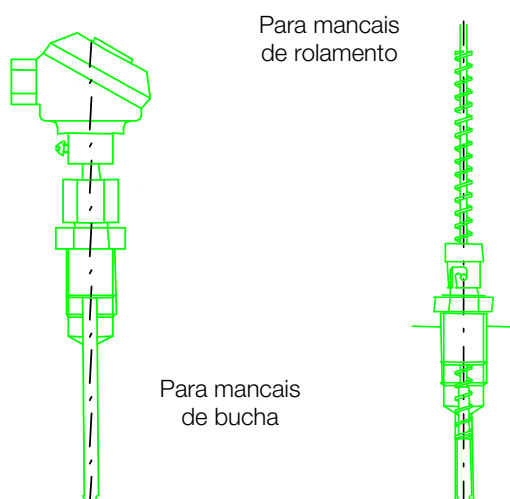



Figura 14.2: Visualização do aspecto externo dos termoresistores.

14.2.2Termistores (PTC e NTC)

São detectores térmicos compostos de sensores semicondutores que variam sua resistência bruscamente ao atingirem uma determinada temperatura.

PTC - *coeficiente de temperatura positivo.*
NTC - *coeficiente de temperatura negativo.*

O tipo "PTC" é um termistor cuja resistência aumenta bruscamente para um valor bem definido de temperatura, especificado para cada tipo. Essa variação brusca na resistência interrompe a corrente no PTC, acionando um relé de saída, o qual desliga o circuito principal. Também pode ser utilizado para sistemas de alarme ou alarme e desligamento (2 por fase).
Para o termistor "NTC" acontece o contrário do PTC, porém, sua aplicação não é normal em motores elétricos, pois os circuitos eletrônicos de controle disponíveis, geralmente são para o PTC (aumento de resistência).
Os termistores possuem tamanho reduzido, não sofrem desgastes mecânicos e têm uma resposta mais rápida em relação aos outros detectores, embora permitam um acompanhamento contínuo do processo de aquecimento do motor. Os termistores com seus respectivos circuitos eletrônicos de controle oferecem proteção completa contra sobre-aquecimento produzido por falta de fase, sobrecarga, sub ou sobre tensões ou frequentes operações de reversão ou liga-desliga. Possuem um baixo custo, relativamente ao do tipo RTD, porém, necessitam de relé para comando da atuação do alarme ou operação.

Figura 14.3 - Visualização do aspecto externo dos termistores

14.2.3 Termômetro

Existem vários tipos de termômetro, um modelo usual que a Weg usa nos mancais é o da Figura 14.4.
A aplicação normalmente é no mancal, também pode ser usado para medir o ar interno do motor e no trocador de calor.
Estes termômetros apresentam indicador local e para a sinalização remota podem possuir contatos auxiliares normalmente abertos e fechados (NA ou/e NF).
Em aplicação onde há ambiente de risco estes devem ser somente com o indicador colocado no motor.

Figura 14.4 - Termômetro com indicador local.

Figura 14.5 - Motor da linha M com vários termômetros.

14.2.4 Termostatos

São detectores térmicos do tipo bimetálico com contatos de prata normalmente fechados, que se abrem quando ocorre determinada elevação de temperatura. Quando a temperatura de atuação do bimetálico abaixar, este volta a sua forma original instantaneamente permitindo o fechamento dos contatos novamente.
Os termostatos podem ser destinados à sistemas de alarme, desligamento ou ambos (alarme ou desligamento) de motores elétricos trifásicos, quando solicitado pelo cliente. São ligados em série com bobina do contator.
Dependendo do grau de segurança e da especificação do cliente, podem ser utilizados três termostatos (um por fase) ou seis termostatos (grupos de dois por fase).
Para operar em alarme e desligamento (dois termostatos por fase), os termostatos de alarme devem ser apropriados para atuação na elevação de temperatura prevista do motor, enquanto que os termostatos de desligamento deverão atuar na temperatura máxima do material isolante.

Figura 14.6 - Detector de temperatura na bobinagem do estator.

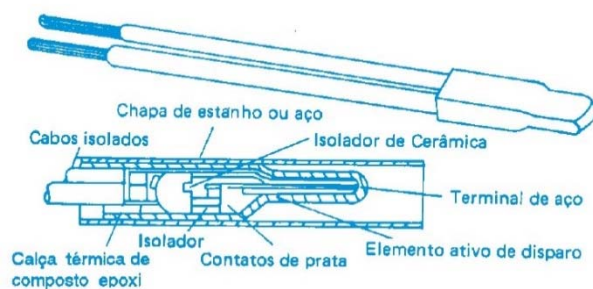



Figura 14.7 - Visualização do aspecto interno e externo do termostato.

COMPARAÇÃO ENTRE OS DETECTORES DE TEMPERATURA MAIS COMUNS

Tabela 14.1: Comparativa entre os detectores de temperatura mais comuns

	Termoresistor (RTD's)	Termistor (PTC e NTC)	Termostato
Mecanismo de proteção	Resistência calibrada	Resistor de avalanche	▪ Contatos móveis ▪ Bimetálicos
Disposição no enrolamento	Interior da ranhura	Interior da ranhura	Interior da ranhura
Forma de atuação	Comando externo de atuação na proteção	Comando externo de atuação na proteção	▪ Atuação direta ▪ Comando externo de atuação da proteção
Limitação de corrente	Corrente de comando	Corrente de comando	Corrente do comando
Tipo de sensibilidade	Temperatura	Temperatura	Corrente e temperatura
Número de unidades por motor	3 ou 6	3 ou 6	3 ou 6
Tipos de comando	Alarme e/ou desligamento	Alarme ou desligamento	Alarme ou desligamento

15 ENSAIOS

Os motores produzidos pela WEG são ensaiados de acordo com as mais rigorosas normas vigentes (NBR 5383, IEC 60034, NEMA MG 1 e API) em modernos laboratórios. Em se falando de motores de grande porte estes laboratórios são capacitados para testar os motores de baixa e alta tensão com potência de até 20000 kVA e tensões de até 15.000 V,o laboratório de ensaios da WEG possui um controle de alta precisão, um sistema de monitoramento dos ensaios completamente informatizado além de equipamentos de última geração utilizados nos melhores laboratórios do mundo.
Os instrumentos utilizados passam por um rigoroso procedimento de calibração, com a garantia do padrão WEG de qualidade.
Os técnicos que realizam os ensaios são altamente treinados e possuem diversas certificações para operação dos equipamentos.
Os ensaios realizados podem ser divididos em três categorias: ensaios de rotina, tipo e especiais. Os ensaios de rotinas são realizados em todos os motores fabricados pela WEG Energia. Os ensaios de tipo são normalmente realizados em uma máquina de uma série de motores iguais ou por solicitação do cliente. Os ensaios especiais podem ser realizados quando solicitados. Todos os ensaios fornecidos pela WEG podem ser realizados por solicitação do cliente, com a presença de inspetores ou não.
A seguir estão listados os ensaios disponíveis. Os ensaios não citados, podem ser realizados pela WEG, mediante uma consulta prévia.

15.1 TIPOS DE ENSAIOS

15.1.1 Ensaio de Rotina

- Resistência elétrica a frio;
- Ensaio de tensão de secundário (motores com rotor bobinado);
- Ensaio em vazio: Medição da corrente e potência absorvida com tensão nominal;
- Ensaio com rotor bloqueado: Medição da corrente, potência consumida e conjugado em tensão nominal ou reduzida (caso não seja possível com a nominal);
- Tensão suportável;
- Resistência de isolamento;
- Verificação de componentes de proteção térmica.

15.1.2 Ensaio de Tipo

- Ensaio de Rotina;
- Elevação de temperatura;
- Resistência elétrica a quente;
- Ensaio de carga: Medição do rendimento, fator de potência, corrente e velocidade com 50%, 75% e 100% da potência nominal;
- Ensaio de conjugado máximo: Com tensão nominal ou reduzida (caso não seja possível com a tensão nominal).

15.1.3 Ensaios Especiais

- Vibração em mancais e eixo
- Ruído
- Tensão no eixo
- Sobrevelocidade
- Desbalanceamento
- Ensaio em partida. Levantamento das curvas características de conjugado e corrente em função da velocidade. A tensão deve ser nominal ou reduzida (Caso não seja possível com a nominal);
- Outros sob consulta.

15.2 LABORATÓRIO DE ENSAIOS

Os laboratórios de ensaios também permitem ensaios utilizando métodos equivalentes de carga ou métodos indiretos tais como dupla frequência. Todos os dados de ensaios são coletados em tempo real.

15.2.1 Características dos laboratórios

Laboratório de ensaios de 5000 kVA
- Tensões :220 V a 13.800 V;
- Frequência: 30 Hz até 60 Hz;
- Potência Instalada: 5000 kVA;
- Dinamômetro: 1 x CC 1.5MW;
- Potência a Plena Carga: Figura 1.

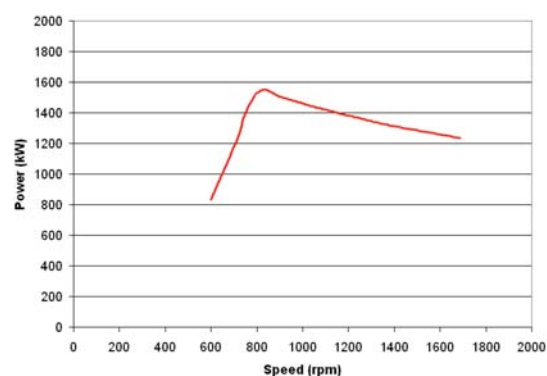



Figura 15.1: Limite de potência para ensaio a plena carga do laboratório de 5MVA

Laboratório de ensaios de 10000 kVA
- Tensões 2300 V a 13800 V;
- Frequência :30 Hz a 60 Hz;
- Potência Instalada :10000 kVA;
- Dinamômetro 1 x CA 5 MW;
- Potência a Plena Carga: Figura 2.

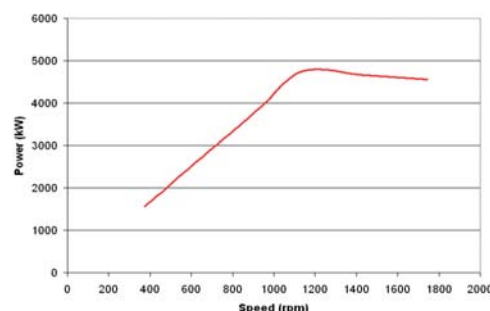



Figura 15.2: Limite de potência para ensaio a plena carga do laboratório de 10MVA

Laboratório de ensaios de 20000 kVA

- Tensões 2300 V a 13800 V;
- Frequência :30 Hz a 60 Hz;
- Potência Instalada :20000 kVA;
- Dinamômetro 2 x CA 5 MW;
- Potência a Plena Carga: Figura 3.

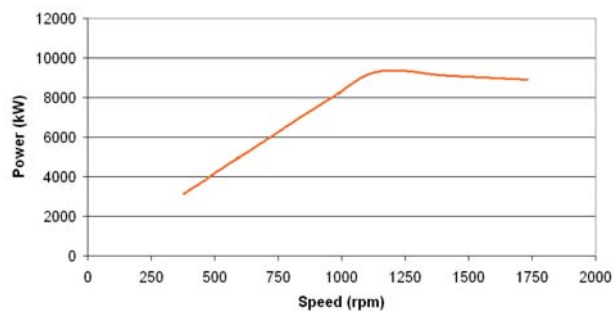



Figura 15.3: Limite de potência para ensaio a plena carga do laboratório de 20MVA

Seguem algumas fotos dos laboratórios de ensaios utilizados.

Figura 15.4 - Laboratório de ensaios

15.3 RELATÓRIOS DE ENSAIO

15.3.1 Relatório de Tipo

A seguir está demonstrado uma parte do procedimento de ensaio de tipo, neste documento normaliza e define os procedimentos e quais os ensaios que serão realizados na avaliação, os resultados obtidos durante a realização do procedimento, também são registrados neste documento.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A – ENERGIA
Relatório de Ensaio de Tipo
Máquina de Indução Trifásica

Nº Série: 1002913890

Identificação

Cliente:	SANDVIK MGS S.A.				
Rotação (rpm):	895	**Modelo:**	HGF500B	**Potência Nominal (cv):**	1250
Proteção:	IP55W	**Corrente de Rotor Bloqueado (p.u.):**	6.00	**Potência Nominal (kW):**	920
Forma Construtiva:	B3E	**Fator Potência:**	0.85	**Freqüência (Hz):**	60
Primário:	4000.0 **V** 163.0 **A** Y	**Elevação de Temperatura (K):**	80	**Temperatura Ambiente (ºC):**	40
		Classe de Isolação:	F	**Regime:**	S1
		Categoria:		**Fator de Serviço:**	1.15
		Altitude (m):	1000	**Massa (kg):**	0.00
				Norma:	IEC

Ensaio em Vazio

Tensão (V): 4000 **Freqüência (Hz):** 60 **Corrente(A):** 54.9 **Potência (W):** 16160

Ensaio de Carga

% Carga	Corrente(A):	Rendimento (%	Rotação (rpm)	Fator de Potência
50	92.0	95.0	898	0.76
75	124.8	96.1	896	0.83
100	162.7	96.0	895	0.85

Ensaio de Elevação de Temperatura - Método da Variação da Resistência

Primário (K): 65.30

Ensaio de Torque

Corrente de Rotor Bloqueado (p.u.):	5.88	**Corrente de Rotor Bloqueado (A):**	958		
Torque Máximo (p.u.):	2.14	**Torque Nominal (Nm):**	9816	**Código:**	
Torque de Rotor Bloqueado (p.u.):	1.01	**Potência de Rotor Bloqueado (kW):**	1429		

Acessórios

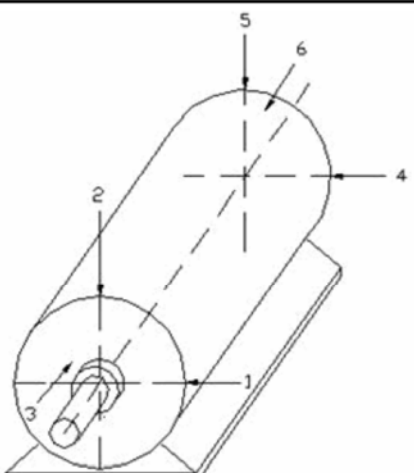
	Tipo	Qtde
Estator	PT-100	6
Mancal	PT-100	2

Resistor de Aquecimento (V): 220.00 **Potência (W):** 300.00

Isolação

	Resistência de Fase (25ºC) Ohms	Resistência de Isolamento (60 seg.) MOhms	Tensão Aplicada (kV)	Índice de Polarização	Índice de Absorção
Primário:	0.085186	3928.00	9.00		
Secundário:					
Resistor de Aquecimento:		929.20	1.50		

Observações

Executado: Clovis Bauer **Aprovado:** Jackson Francisco Maia **Data:** 17/11/2008

15.3.2 Relatório de Rotina

A seguir está demonstrado uma parte do procedimento de ensaio de Rotina, neste documento normaliza e define os procedimentos e quais os ensaios que serão realizados na avaliação, os resultados obtidos durante a realização do procedimento, também são registrados neste documento.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A – ENERGIA
Relatório de Ensaio de Rotina
Máquina de Indução Trifásica

Nº Série: 1002913890

Identificação

Cliente: SANDVIK MGS S.A.					
Rotação (rpm):	895	**Modelo:**	HGF500B	**Potência Nominal (cv):**	1250
Proteção:	IP55W	**Corrente de Rotor Bloqueado (p.u.):**	6.00	**Potência Nominal (kW):**	920
Forma Construtiva:	B3E	**Fator Potência:**	0.85	**Freqüência (Hz):**	60
Primário:	4000.0 **V** 163.0 **A** Y	**Elevação de Temperatura (K):**	80	**Temperatura Ambiente (ºC):**	40
		Classe de Isolação:	F	**Regime:**	S1
		Categoria:		**Fator de Serviço:**	1.15
		Altitude (m):	1000	**Massa (kg):**	0.00
				Norma:	IEC

Ensaio em Vazio

Tensão (V):	4000	**Freqüência (Hz):**	60	**Corrente(A):**	54.9	**Potência (W):**	16160

Ensaio de Torque

Corrente de Rotor Bloqueado (p.u.):	5.88	**Corrente de Rotor Bloqueado (A):**	958	
		Torque Nominal (Nm):	9816	**Código:**
Torque de Rotor Bloqueado (p.u.):	1.01	**Potência de Rotor Bloqueado (kW):**	1429	

Acessórios

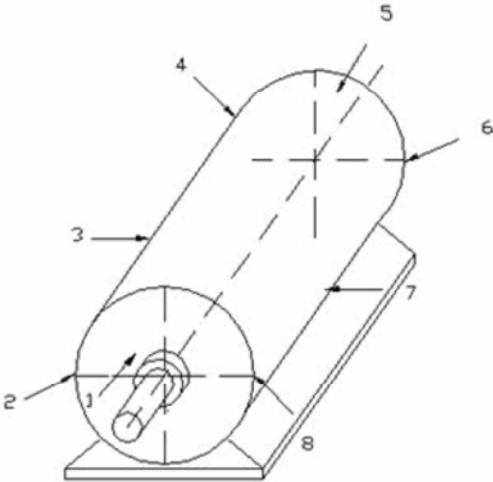
	Tipo	**Qtde**
Estator	PT-100	6
Mancal	PT-100	2

Resistor de Aquecimento (V): 220.00 **Potência (W):** 300.00

Isolação

	Resistência de Fase (25ºC) Ohms	**Resistência de Isolamento (60 seg.) MOhms**	**Tensão Aplicada (kV)**	**Índice de Polarização**	**Índice de Absorção**
Primário:	0.085186	3928.00	9.00		
Secundário:					
Resistor de Aquecimento:		929.20	1.50		

Observações

Executado: Clovis Bauer **Aprovado:** Jackson Francisco Maia **Data:** 17/11/2008

15.3.3 Relatório de Vibração

A seguir está demonstrado uma parte do procedimento de ensaio de Vibração, neste documento normaliza e define os procedimentos e quais os ensaios que serão realizados na avaliação, os resultados obtidos durante a realização do procedimento, também são registrados neste documento.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A – ENERGIA
Relatório de Ensaio de Vibração
Máquina de Indução Trifásica

Nº Série: 1002913890

Identificação

Cliente:	SANDVIK MGS S.A.				
Rotação (rpm):	895	**Modelo:**	HGF500B	**Potência Nominal (cv):**	1250
Proteção:	IP55W	**Corrente de Rotor Bloqueado (p.u.):**	6.00	**Potência Nominal (kW):**	920
Forma Construtiva:	B3E	**Fator Potência:**	0.85	**Freqüência (Hz):**	60
Primário:	4000.0 **V** 163.0 **A** Y	**Elevação de Temperatura (K):**	80	**Temperatura Ambiente (ºC):**	40
		Classe de Isolação:	F	**Regime:**	S1
		Categoria:		**Fator de Serviço:**	1.15
		Altitude (m):	1000	**Massa (kg):**	0.00
				Norma:	IEC

Resultados

Condição:	Frio	**Montagem:**	Fixo Base
Unidade:	mm/s rms	**Sentido Rotação:**	Horário

Ponto 1:	0.8900
Ponto 2:	0.9500
Ponto 3:	1.1200
Ponto 4:	0.7400
Ponto 5:	0.6400
Ponto 6:	0.8000

Observações

Executado: Clovis Bauer **Aprovado:** Jackson Francisco Maia **Data:** 17/11/2008

15.3.4 Relatório de Ruído

A seguir está demonstrado uma parte do procedimento de ensaio de Ruído, neste documento normaliza e define os procedimentos e quais os ensaios que serão realizados na avaliação, os resultados obtidos durante a realização do procedimento, também são registrados neste documento.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A – ENERGIA
Relatório de Ensaio de Ruído
Máquina de Indução Trifásica

Nº Série: 1003116709

Identificação

Cliente:	SANDVIK MGS S.A.				
Rotação (rpm):	895	**Modelo:**	HGF500C	**Potência Nominal (cv):**	1500
Proteção:	IP55W	**Corrente de Rotor Bloqueado (p.u.):**	6.00	**Potência Nominal (kW):**	1104
Forma Construtiva:	B3D	**Fator Potência:**	0.81	**Freqüência (Hz):**	60
Primário:	4000.0 **V** 203.7 **A** Y	**Elevação de Temperatura (K):**	80	**Temperatura Ambiente (ºC):**	40
		Classe de Isolação:	F	**Regime:**	S1
		Categoria:	N	**Fator de Serviço:**	1.15
		Altitude (m):	1000	**Massa (kg):**	0.00
				Norma:	IEC

Resultados

Unidade:	dB(A)
Ponto 1:	81.1
Ponto 2:	79.1
Ponto 3:	80.9
Ponto 4:	81.1
Ponto 5:	80.5
Ponto 6:	81.1
Ponto 7:	81.3
Ponto 8:	80.4
Média de Ruído Medido:	81.9
Média de Ruído de Fundo:	75.7
Média de Ruído Corrigido:	80.8

Observações

Executado: Tobias Milani Dietrich **Aprovado:** Paulo Cesar Gialdi Da Silva **Data:** 10/11/2008

16 MOTORES SÍNCRONOS

Os motores síncronos são utilizados com frequência nas indústrias, geralmente para aplicações que exigem alto torque nominal (isso significa aplicações com alta potência e/ou baixa rotação nominal). Nestas condições, os motores síncronos apresentam vantagens importantes em comparação aos motores de indução, como o controle de fator de potência e a velocidade invariante com a carga.

Devido à sua característica de controle do fator de potência, os motores síncronos possuem uma aplicação específica, onde são ligados à rede de algumas concessionárias em vazio, com o único objetivo de absorver ou fornecer energia reativa à rede. A estas máquinas, dá-se o nome de “compensador síncrono”.

Atualmente, com o advento da tecnologia de imãs permanentes, os motores síncronos vêm sendo largamente aplicados também em aplicações de baixas potências. Motores síncronos de imã permanente apresentam eficiência superior aos motores de indução, sendo ideais para aplicações que exigem variação de velocidade do acionamento, onde é necessário a utilização de inversores de frequência.

O termo SÍNCRONO tem sua origem no Grego, onde o prefixo:

SIN significa “COM”

CRONOS significa “TEMPO”

O motor síncrono possui em seu rotor um campo magnético induzido através do enrolamento de campo ou ainda através de imãs permanentes. Este campo interage com o campo girante do estator, sendo atraído pelo mesmo e seguindo na mesma velocidade da rede (sem escorregamento).

Uma vez que o motor trabalha exatamente “com o tempo” da rede, é utilizado o termo SÍNCRONO.

17 PARTES CONTRUTIVAS DOS MOTORES SÍNCRONOS

O motor síncrono Figura 2.1 é composto fundamentalmente de três partes: *estator, rotor e sistema de excitação*. O exemplo mostrado nesta figura é um motor de polos lisos com excitação tipo brushless.

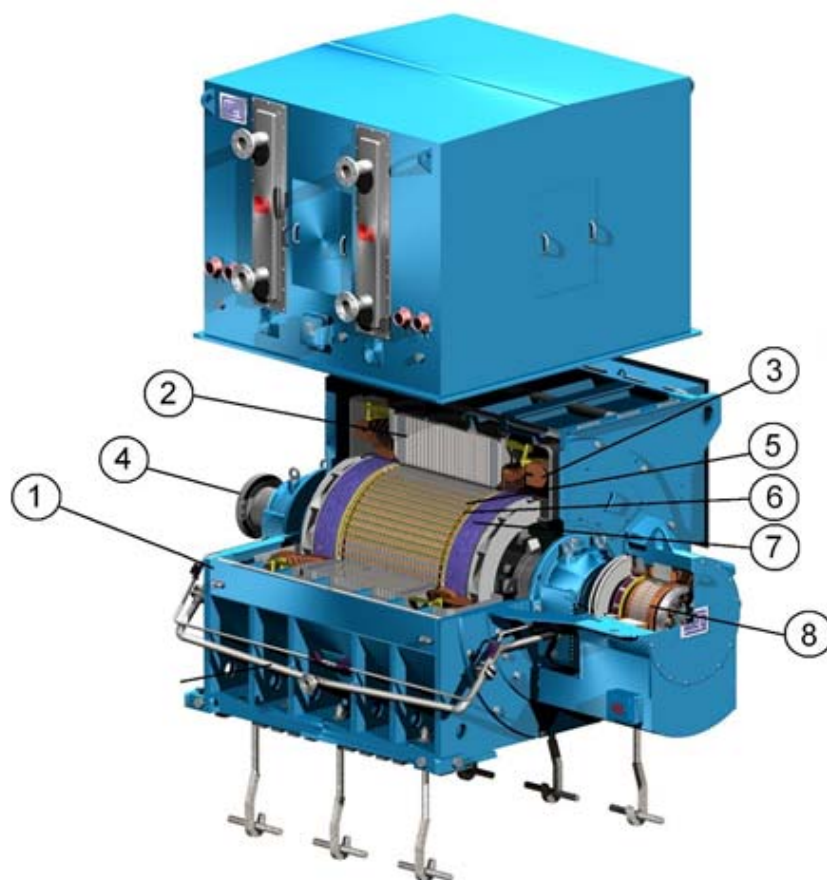



Figura 17.1: Motor síncrono trifásico, principais componentes

17.1 ESTATOR

O estator de um motor síncrono é semelhante ao de um motor de indução, sendo construído por chapas laminadas isoladas entre si, e enrolamento que pode ser de bobinas de fio circular, para máquinas de baixa tensão, como de bobinas pré-formadas, compostas por fios de seção retangular, para média tensão (> 1000V). O estator é composto das seguintes partes:

- Carcaça (1): É a estrutura suporte do conjunto, de constituição robusta em aço soldado, resistente à corrosão;
- Núcleo de chapas (2): As chapas são de aço magnético (geralmente em aço-silício), tratadas termicamente e com a superfície isolada para reduzir ao mínimo as perdas no ferro;
- Enrolamento trifásico (3): Três conjuntos iguais de bobinas, um para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede de alimentação.

17.2 ROTOR

O rotor de uma máquina síncrona difere de um motor de indução, pois possui dois circuitos: um sendo o enrolamento de campo, responsável pela excitação da máquina e por formar os polos magnéticos do rotor; e o outro sendo a gaiola de partida (ou de amortecimento), responsável pela partida assíncrona do motor e por suportar e amortecer variações de carga e da rede, mantendo o motor em sincronismo. Em algumas máquinas síncronas o rotor pode ser constituído por um imã permanente no lugar de um eletroímã, sendo neste caso denominado máquina síncrona de imã permanente. O rotor é formado pelas seguintes partes:

- Eixo (4): Em aço, transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga;

- Núcleo (5): O núcleo do rotor pode ser construído por chapas laminadas ou ainda de construção sólida num único bloco de aço, não há necessidade das características da chapa serem as mesmas do estator, pois sobre o rotor há circulação somente de corrente contínua na operação em regime permanente, que não proporciona perdas significativas no ferro;

- Gaiola de partida (amortecimento) (6): É composta de barras e anéis de curto-circuito, geralmente montados nas extremidades dos polos do rotor ou junto com os enrolamentos de campo no caso de rotor de polos lisos. Utilizada para partir o motor utilizando os mesmos princípios dos motores de indução assíncrono. Pode ser de cobre eletrolítico ou latão. Durante o regime nominal de operação tem ainda a função de amortecer variações bruscas de carga e transitórios na rede, auxiliando a manter o motor no sincronismo;

- Bobinas de campo (7): Também chamado de enrolamento de campo, é formado por um conjunto de bobinas alimentadas por corrente contínua pelo sistema de excitação.

17.3 EXCITATRIZ

A excitatriz de um motor síncrono é responsável por injetar corrente contínua no enrolamento de campo. Pode ser do tipo estática (através do uso de escovas) ou brushless.

- Excitatriz Estática: A excitatriz estática é formada por escovas e anéis coletores, responsáveis por transferir a corrente de corrente contínua diretamente de um painel de excitação para o rotor do motor;

- Excitatriz Brushless (8): Consiste em dois enrolamentos, um no estator e outro no rotor, e uma roda de diodos e varistores, responsável pela retificação da tensão induzida no rotor da excitatriz. O enrolamento do estator é alimentado com corrente contínua, gerando campos magnéticos no estator. Estes campos magnéticos interagem com os enrolamentos do rotor da excitatriz, induzindo tensão nos mesmos, proporcional à velocidade com que o rotor gira. Esta tensão induzida é alternada, e por este motivo necessita ser retificada através da ponte de diodos para alimentar o enrolamento de campo.

18 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES SÍNCRONOS

18.1 CAMPO GIRANTE

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido perpendicular ao plano da bobina e de valor proporcional à intensidade da corrente e ao número de espiras.

Na Figura 18.1 é representado um enrolamento monofásico simplificado, atravessado por uma corrente I, e o campo magnético H, criado por ela. O enrolamento é constituído de um par de polos, um polo norte e um polo sul, cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H. O fluxo magnético atravessa o rotor através dos dois polos e se fecha através do núcleo do estator.

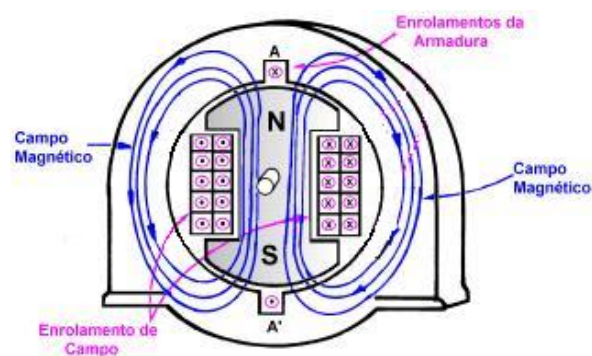



Figura 18.1: Enrolamento monofásico simplificado

Se a corrente I é alternada, o campo H também é, e o seu valor a cada instante será representado pelo mesmo gráfico da Figura 18.2, inclusive invertendo o sentido em cada meio ciclo.

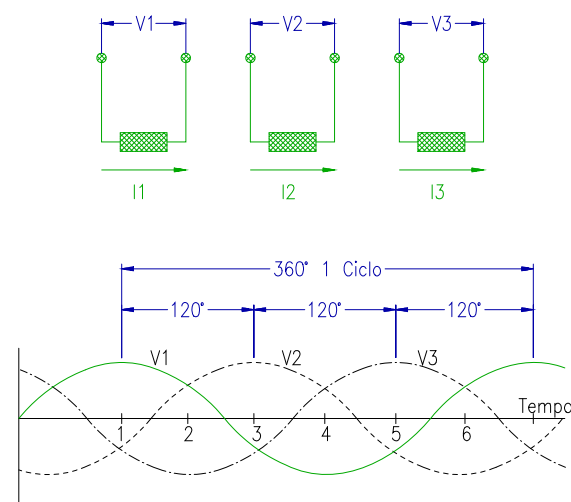



Figura 18.2: Sistema de tensões trifásico

Portanto a intensidade do campo H é também senoidal, e varia proporcionalmente à intensidade da corrente na bobina.

Na Figura 18.3 é indicado um enrolamento trifásico, composto por três enrolamentos monofásicos distintos, espaçados entre si de 120º. Se cada um destes enrolamentos for alimentado por uma fase de um sistema trifásico, as correntes I1, I2 e I3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H1, H2 e H3. Estes campos são espaçados entre si de 120º.

Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de 120º entre si e podem ser representados por um gráfico igual ao da Figura 18.3. O campo total H resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos H1, H2 e H3 naquele instante.

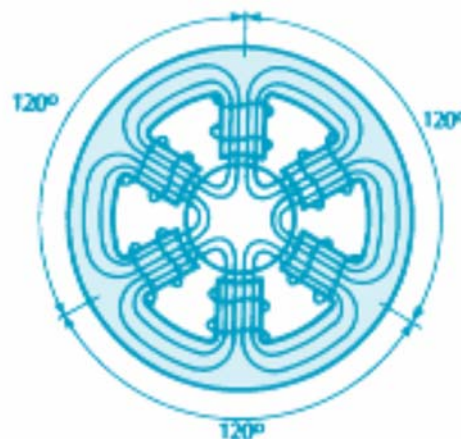



Figura 18.3: Enrolamento trifásico

A Figura 18.4, representa esta soma gráfica para seis instantes sucessivos.

No instante (1), a Figura 18.4 mostra que o campo H1 é máximo e que os campos H2 e H3 são negativos e de mesmo valor, iguais a 0,5 x H1. Os três campos representados na Figura 18.4 (parte superior), levando em conta que o campo negativo é representado por uma seta de sentido oposto ao que seria normal; o campo resultante (soma gráfica) é mostrado na parte inferior da Figura 18.4 (1), tendo a mesma direção do enrolamento da *fase* 1.

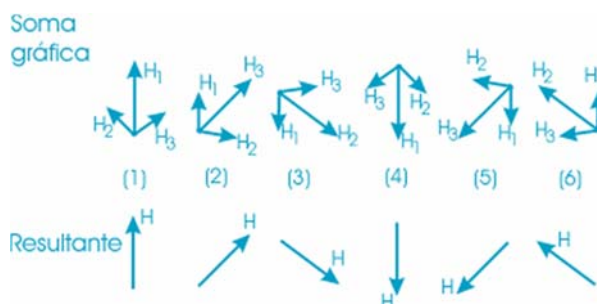



Figura 18.4: Campo magnético resultante

Repetindo a construção para os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 da Figura 18.4, observa-se que o campo resultante H tem intensidade "constante", porém sua direção vai girando, completando uma volta no fim de um ciclo.
Assim, quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um campo girante, como se houvesse um par de polos girantes, de intensidade constante.

18.2 OPERAÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS

O motor síncrono possui o rotor com número de polos correspondente ao número de polos do enrolamento do estator.

Durante a operação normal em regime, não há nenhum movimento relativo entre os polos do rotor e o fluxo magnético do campo girante do estator (polos do estator), ou seja, estão em perfeito sincronismo.

O campo magnético do rotor tenderá a sempre se alinhar com o campo magnético do estator, porém os dois campos magnéticos nunca estão perfeitamente alinhados, pois a existência de um torque resistente gera um defasamento entre os campos, embora estejam rodando a mesma velocidade. Mesmo que em vazio, o motor possui conjugado resistente gerado pelo atrito dos mancais e pelo sistema de ventilação.

Este defasamento gera um ângulo , chamado de ângulo de carga, ou ângulo de torque. Este ângulo de carga aumenta à medida que aumenta o torque resistente.

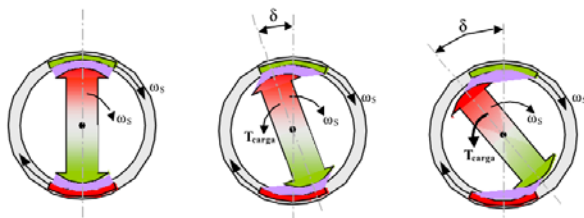



Figura 18.5: Defasamento entre os campos

A "interação" entre os campos magnéticos irá produzir o conjugado no eixo do motor que é função de:

$$C = \frac{P_s}{\omega_s}$$

Onde: C = conjugado nominal (Nm);
P_s = potência saída nominal (kW);
ω_s = velocidade angular (radianos por segundo).

Por sua vez a "potência de saída" do motor depende das perdas totais no motor, que são:

- Perdas totais no cobre do estator;
- Perdas totais no cobre do rotor;
- Perdas por atrito e ventilação;
- Perdas no ferro.

18.2.1 Velocidade Síncrona

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de par de polos (2p) do motor e da frequência (f) da rede, em ciclos por segundo (Hertz).

Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um "norte" e um "sul") ao longo da periferia do núcleo magnético.

O campo girante percorre um par de polos (p) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento possui pares de polos, a velocidade do campo girante será:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot f}{2p} \qquad [rpm]$$

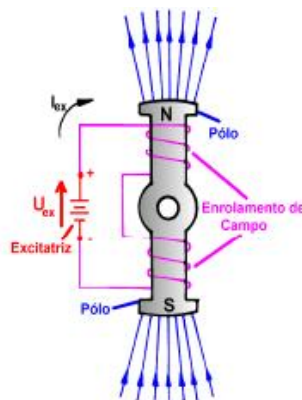



Figura 18.6: Campo do Rotor – Polo

<u>Exemplos:</u>

a) Qual a rotação síncrona de um motor de 6 polos, 60 Hz?

$$n_s = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200rpm$$

b) Motor de 12 polos, 50 Hz?

$$n_s = \frac{120 \cdot 50}{12} = 500rpm$$

Note que o número de polos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de polos. Para as frequências e "polaridades" usuais, as velocidades síncronas são:

Nº de polos	Rotação síncrona por minuto	
	60 Hz	50Hz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600

Tabela 18.1: Velocidades síncronas

Por exemplo, para um motor de seis polos teremos, em um ciclo completo, um giro do campo de 360° * 2/6 = 120° geométricos. Isto equivale, logicamente, a 1/3 da velocidade em dois polos. Conclui-se, assim, que:

Graus elétricos = Graus mecânicos x Número de polos.

Para motores de dois polos, o campo percorre uma volta a cada ciclo. Assim, os graus elétricos equivalem aos graus mecânicos.

Para motores com mais de dois polos, teremos de acordo com o número de polos, um giro "geométrico" menor, sendo inversamente proporcional a 360° em dois polos.

19 TIPOS DE EXCITAÇÃO

Os motores síncronos necessitam de uma fonte de corrente contínua para alimentar o enrolamento de campo (enrolamento do rotor), através de anéis coletores e escovas (excitatriz estática) ou através de uma excitatriz girante sem escovas (brushless).

19.1 EXCITATRIZ ESTÁTICA (COM ESCOVAS)

Motores Síncronos com excitatriz do tipo estática são constituídos de anéis coletores e escovas que possibilitam a alimentação de corrente dos polos do rotor através de contato deslizante.

A Corrente Contínua para alimentação dos polos deve ser proveniente de um conversor e controlador estático CA/CC.

A excitatriz estática é bastante utilizada em aplicações com variação de velocidade através de Inversores de Frequência, ou ainda em máquinas onde a potência é muito elevada para a utilização do sistema brushless.

Uma desvantagem da excitatriz estática é o desgaste das escovas devido ao contato permanente com os anéis coletores do rotor, aumentando a manutenção necessária na máquina. Porém em aplicações que exijam elevada corrente de excitação ou resposta dinâmica da máquina muito rápida, esta é a única solução possível.

Figura 19.1: Esquema do sistema de excitação com escovas e anéis coletores

Figura 19.2: Anéis coletores

Figura 19.3: Porta escovas e anéis coletores

Figura 19.4: Esquema de excitação estática

19.2 EXCITATRIZ BRUSHLESS (SEM ESCOVAS)

Motores Síncronos com sistema de excitação brushless possuem uma excitatriz girante, normalmente localizada em um compartimento na parte traseira do motor. A excitatriz funciona como um gerador de corrente alternada onde o rotor que fica localizado no eixo do motor, possui um enrolamento trifásico e o estator é formado por polos alternados norte e sul alimentados por uma fonte de corrente contínua externa.

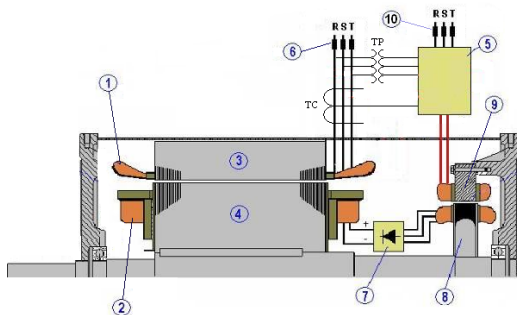
O enrolamento trifásico do rotor é conectado a uma ponte de diodos retificadores. A tensão gerada no rotor é retificada e utilizada para a alimentação do enrolamento de campo do motor. A amplitude desta corrente de campo pode ser controlada através do retificador que alimenta o campo do estator da excitatriz. Os motores síncronos com excitação brushless possuem um custo de manutenção reduzido devido ao fato de não possuírem escovas. Por não possuírem contatos elétricos deslizantes, eliminando a possibilidade de faíscamento, os motores síncronos com excitação do tipo brushless são recomendados para aplicações em áreas especiais com atmosfera explosiva.

Figura 19.5: Esquema de uma excitatriz brushless

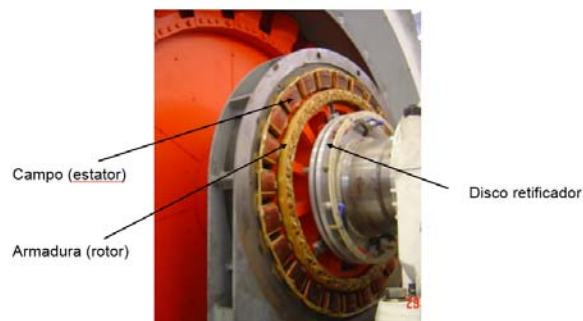
Figura 19.6: Esquemático em corte de uma máquina síncrona

Figura 19.7: Rotor de excitatriz Brushless e seus componentes

Figura 19.8: Excitatriz brushless completa (estator e rotor)

Figura 19.9: Esquema de conexão de uma excitatriz CC brushless

19.3 EXCITATRIZ BRUSHLESS CA

Em situações onde haja necessidade de grandes variações de velocidade, não é possível alimentar a excitatriz com corrente contínua, pois em baixas velocidades a alimentação CC não é capaz de induzir a corrente necessária no rotor para excitar a máquina síncrona. Portanto nestas condições, é utilizado um conceito de alimentação em corrente alternada.

A excitatriz CA é composta de dois enrolamentos (normalmente trifásicos) no rotor e no estator. O campo girante gerado no estator deve ser sempre no sentido oposto ao sentido de giro do rotor, de forma a aumentar a frequência gerada no rotor conforme há o aumento da velocidade.

20 CONSTRUÇÃO DO ROTOR DOS MOTORES SÍNCRONOS

Dependendo de critérios físicos e de projeto, da aplicação, condições de operação e características de desempenho necessárias, os motores síncronos podem ser concebidos com rotor de polos lisos ou polos salientes. E ainda, na configuração em polos salientes, estes podem ser laminados ou sólidos.

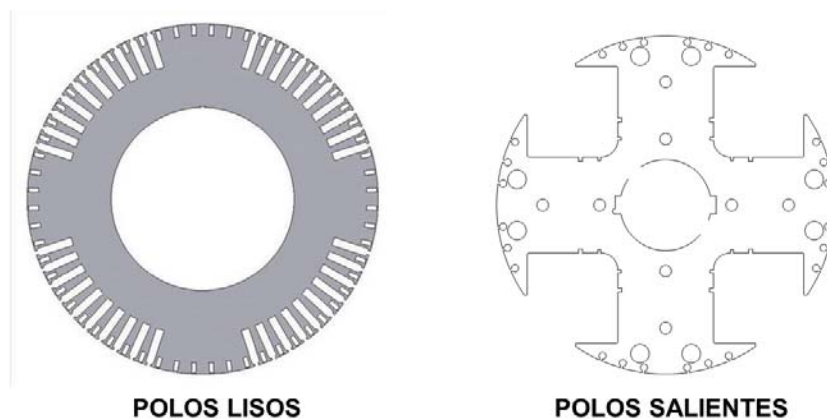



Figura 20.1:Polos Lisos e Polos Salientes – Rotor

POLOS LISOS POLOS SALIENTES

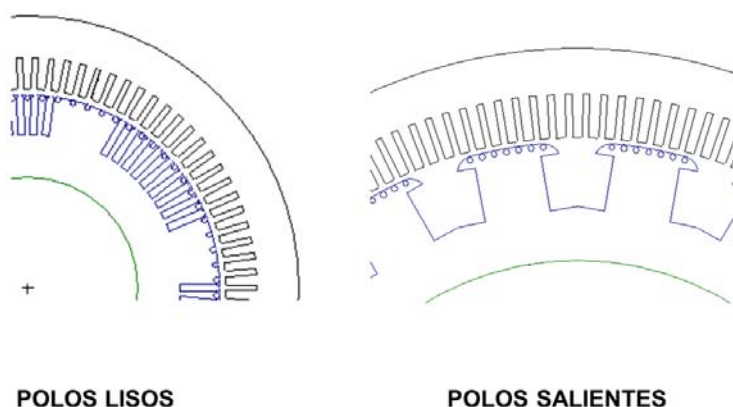



Figura 20.2:Polos Lisos e Polos Salientes – Rotor e Estator

20.1 POLOS LISOS

Os rotores de polos lisos são caracterizados por possuírem forma cilíndrica uniforme e pacote de chapas não segmentadas, estampadas em peça única ou cortadas a laser, montado no eixo geralmente através de “costelas”.

Os polos são formados pelo agrupamento das chapas do pacote e portanto fazem parte do pacote de chapas do rotor, não sendo destacáveis. As bobinas de campo são confeccionadas em fios de cobre isolados e alojadas em ranhuras do pacote de chapas, com configuração de bobinas distribuídas ao redor dos polos na periferia do rotor. As cabeças de bobina são fixadas através de bandagem ou capa de aço moldada nas bobinas.
A gaiola desse tipo de rotor é também simetricamente distribuída.

Esta configuração de rotor possui alta simetria, massas distribuídas uniformemente em toda a extensão do rotor, tornando-o cilíndrico, compacto e robusto.
Devido essas características os motores síncronos com rotor de polos lisos são mais comumente utilizados em máquinas de alta rotação.

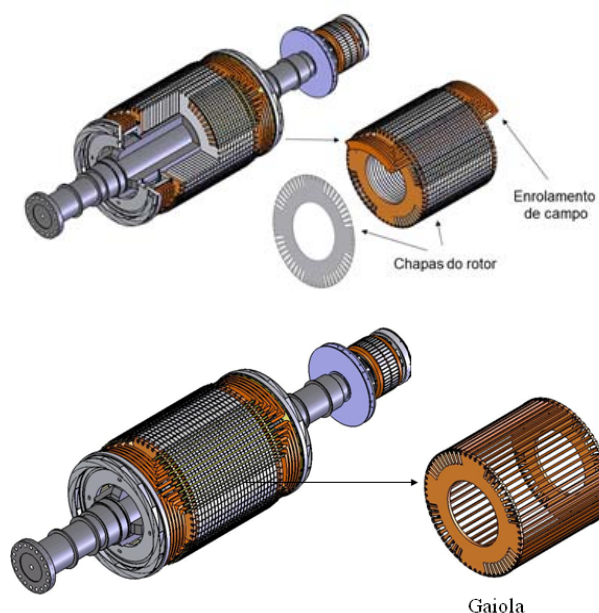



Figura 20.3: Rotor de Polos Lisos

Devido a esta construção do rotor, o entreferro é praticamente constante em toda a circunferência do rotor, com caminhos possíveis para fluxo magnético também pelas regiões interpolares, onde também há chapas, o que proporciona maior dispersão de fluxo, fazendo com que as características da máquina no sentido preferencial de magnetização sejam mescladas com as do sentido não-preferencial, e tornando assim as características de eixo direto praticamente iguais às de eixo em quadratura.

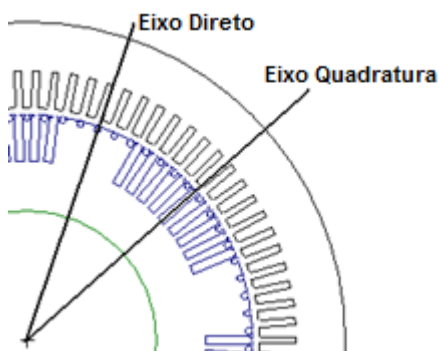



Figura 20.4: Eixo direto e eixo quadratura (polos lisos)

As particularidades destacadas acima conferem aos motores síncronos de polos lisos uma curva de torque mais suave e menor torque pulsante durante a partida assíncrona, quando comparados aos de polos salientes.

A configuração com pacote de chapas não segmentadas e bobinas de campo distribuídas no rotor de polos lisos proporciona a concepção de dutos (ou canais) radiais em toda a extensão do rotor, onde cada duto pode ser confeccionado de forma a funcionar como pás de um ventilador, contribuindo para maior arrefecimento tanto das chapas como das bobinas de campo no sentido axial do rotor. Essa característica minimiza pontos quentes no rotor e degradação precoce dos materiais isolantes.

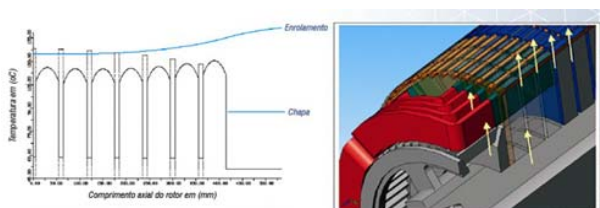



Figura 20.5: Gráfico Temperatura x Comprimento axial do motor

20.2 POLOS SALIENTES

Os rotores de polos salientes, como o próprio nome já diz, apresentam os polos visivelmente destacados no rotor da máquina. E a configuração mais usual desse tipo de máquina é em polos salientes laminados e extraíveis

20.2.1 Polos Salientes Laminados

Em máquinas de polos salientes de médio e grande porte, o rotor normalmente possui uma roda polar fixada ao eixo e então os polos são destacáveis e fixados individualmente na roda polar através de pinos/parafusos ou através de encaixes comumente do tipo “rabo de andorinha” ou “cabeça de martelo”, traváveis por meio de cunhas e calços metálicos. Nessa configuração os polos são fabricados em chapas de aço laminadas, prensadas e travadas, formando o corpo do polo e a sapata, em peça única, onde na sua base são executados os furos com roscas para fixação por pinos/parafusos ou as proeminências no próprio corpo do polo, nas formas de “rabo de andorinha” ou “cabeça de martelo”, para encaixe e travamento na roda polar.

Figura 20.6: Detalhe do "rabo de andorinha" na confecção do polo

As bobinas do enrolamento de campo, instaladas nos polos, são formadas por fios de cobre com isolação própria ou barras/placas de cobre planas isoladas, interligadas, formando as espiras. Nessa configuração de polos as bobinas podem ser confeccionadas em separado dos polos e posteriormente montadas nos mesmos, ou então confeccionadas já sobre estes. Essa característica construtiva proporciona maior flexibilidade ao processo de bobinagem e manutenção desse tipo de rotor.

Nesse tipo de construção de polo as bobinas são concentradas, o que dificulta trocas térmicas no sentido axial do rotor, principalmente na região central do pacote, troca essa importante para o arrefecimento tanto das bobinas como dos polos. Por isso os critérios de projeto e fabricação das bobinas, seus isolantes próprios, isolantes entre elas e os polos, e fixação entre essas partes, buscam otimizar ao máximo a transferência de calor e dissipação térmica desses componentes, visando temperaturas adequadas aos materiais isolantes e buscando assim longa vida ao enrolamento de campo dessas máquinas.

As barras da gaiola de partida desse tipo de rotor são alojadas na sapata polar de cada polo e curto-circuitadas nas extremidades através dos segmentos dos anéis de curto-circuito da gaiola em cada polo. Com os polos fixados na roda polar, os segmentos da gaiola de cada polo são conectados entre si formando a gaiola completa do rotor da máquina de polos salientes. A gaiola portanto é assimétrica, com suas barras localizadas apenas as áreas das sapatas polares de cada polo, não ocupando as regiões interpolares.

Figura 20.7: Detalhe da gaiola de partida

O entreferro das máquinas de polos salientes não é constante em toda a circunferência do rotor, devido ao formato dos polos e à saliência entre eles. Por isso o escoamento do fluxo magnético é facilitado nas regiões onde as chapas estão presentes e dificultado nas regiões interpolares, preenchidas por ar.
Dessa forma, nesse tipo de rotor há menor dispersão do fluxo magnético nas regiões interpolares, em comparação com as máquinas de polos lisos, o que faz com que as características de eixo direto sejam bem diferentes das de eixo em quadratura, devido justamente ao sentido preferencial de magnetização no sentido dos polos.
Devido essa particularidade, as máquinas síncronas de polos salientes possuem circuito equivalente com valores distintos para eixo direto e para eixo em quadratura.

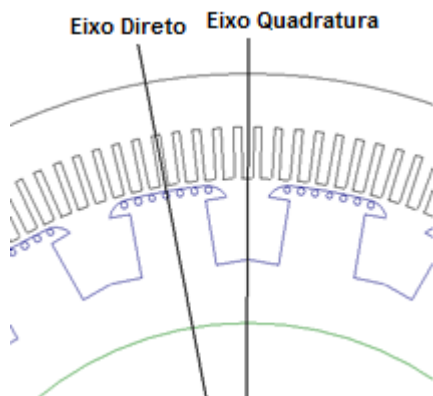



Figura 20.8: Eixo direto e eixo quadratura (polos salientes)

Nos rotores das máquinas síncronas de polos salientes a distribuição de massa não é uniforme, pois está mais concentrada nas regiões dos polos, e consequentemente menos nas regiões interpolares, pois é uma característica intrínseca à construção dessa configuração de máquina.
Dependendo do porte e rotação da máquina, em função das velocidades periféricas e forças centrífugas envolvidas no rotor, essa característica pode fazer com que o projeto e a construção da máquina apresentem pontos críticos ou até limitados. Um exemplo seria a especificação de um motor síncrono de grande porte numa aplicação em alta rotação, onde uma máquina de polos lisos seria mais indicada.
Por este motivo motores síncronos de polos salientes laminados e de grande porte são mais comumente utilizados em máquinas de baixa rotação.

20.2.2 Polos Salientes Sólidos (Maciços)

A outra configuração de polos salientes diferente da apresentada acima é a de polos salientes sólidos (ou maciços).
Nessa configuração o rotor é constituído por uma peça inteira, sólida, com o eixo e os polos usinados em um único bloco de aço forjado.

Figura 20.9: Detalhe do bloco do eixo em aço forjado

Os polos podem ser concebidos e usinados já com as sapatas integrais, usinadas juntamente e formando um bloco sólido único. Ou então com as sapatas usinadas separadamente, para fixação nas cabeças dos polos através de parafusos, proporcionando a desmontagem para fins de manutenção.

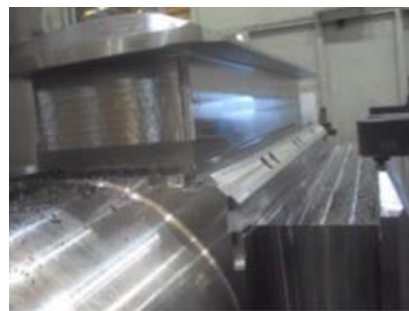



Figura 20.10: Usinagem dos polos do rotor do motor síncrono linha SM40

Figura 20.11: Rotor usinado do motor síncrono linha SM40

Os diferenciais entre essas duas configurações é que no caso das sapatas extraíveis, as bobinas dos polos podem ser confeccionadas fora dos mesmos, depois instaladas nestes sem as sapatas e então fixadas e travadas pelas sapatas parafusadas nas cabeças dos polos. Na configuração com sapatas integrais, apesar da necessidade das bobinas serem confeccionadas diretamente nos polos, o que é mais trabalhoso, a construção é mais robusta e não sujeita a falhas na fixação das sapatas ou falhas nos parafusos que fixam as sapatas, que caso venham a acontecer, podem causar danos críticos à máquina.

Essa configuração de polos, apesar de também possuir distribuição de massa não uniforme por ser em polos

salientes, é mais robusta, já que os polos fazem parte do próprio bloco do rotor e eixo, possibilitando dimensionamento mecânico de forma a suportar maiores velocidades periféricas e maiores forças centrífugas, em função da rotação ou do porte da máquina. Com isso esse tipo de rotor é aplicado tipicamente em máquinas de quatro e seis polos, rotações consideradas altas para máquinas de polos salientes.

Figura 20.12: Detalhe do rotor de 4 polos

Também em função da robustez desse tipo de construção do rotor, da maior facilidade em se obter altos níveis de torque com baixos níveis de corrente na partida, de não possuir gaiola para partida e de permitir maiores temperaturas nas sapatas polares durante a partida, este tipo de máquina é muito utilizado no acionamento de cargas de alta inércia e alto torque resistente na partida, que ocasionam tempos de partida longos. Dessa forma o acionamento de grandes compressores, refinadores de madeira, ventiladores e exaustores são aplicações típicas para este tipo de motor síncrono.

Como já abordado no item relativo à gaiola dos motores síncronos, o efeito das correntes de Foucault nas sapatas dos polos sólidos durante a partida provoca altas temperaturas nas mesmas, mais intensamente na superfície e na região dos dentes da sapata, pontos importantes de serem considerados no dimensionamento dos materiais isolantes das bobinas e na refrigeração do rotor. Na configuração de polos com sapatas parafusadas, o dimensionamento e a instalação dos parafusos de fixação das sapatas é um ponto crítico a ser considerado, pois caso ocorra falha na fixação durante a operação do motor, um único parafuso solto pode provocar dano considerável à máquina.

Para esta configuração de rotor, também por ser em polos salientes, são aplicáveis os mesmos aspectos já destacados nos rotores de polos laminados relativos às características de eixo direto e eixo em quadratura, curva de torque e torque pulsante, em comparação com as máquinas síncronas de polos lisos.

A WEpossui uma linha específica de motores síncronos de polos salientes sólidos com sapatas integrais (já usinadas nos polos), chamada Linha SM40. As aplicações típicas dessa linha de motores são grandes compressores, refinadores, ventiladores, exaustores, nos segmentos de óleo&gás, separação de gases, papel e celulose.

Figura 20.13: Rotor completo do motor síncrono linha SM40

21 MÉTODOS DE PARTIDA

Os métodos de partida aplicáveis aos motores síncronos são basicamente os mesmos aplicáveis aos motores de indução, já que a partida de uma máquina síncrona é assíncrona.

Vale ressaltar que assim como no motor de indução, nos motores síncronos a avaliação da inércia da carga a ser acionada pelo motor e da curva de torque resistente da carga na partida também é de extrema importância.

A diferença é que nos motores síncronos existe a atuação no rotor da máquina devido à necessidade de se fornecer corrente contínua para excitação e sincronização. E por isso existem as particularidades conforme abordadas anteriormente.

Especial atenção deve ser dada ao momento da sincronização, no que tange às características da carga acionada e ao torque Pull-in do motor, que deve ser adequado para colocar o motor em sincronismo ao final da partida assíncrona, próximo da rotação nominal. Daí a importância em se conhecer os dados de partida da carga que será acionada por um motor síncrono, para se especificar adequadamente o torque de Pull-in do mesmo para que a sincronização seja adequada.

21.1 TIPOS DE PARTIDA

Os principais métodos de partida aplicáveis a motores síncronos são:

- Partida direta;
- Partida com tensão reduzida da rede (chave estrela-triângulo, autotransformador, reator);
- Partida com motor auxiliar acoplado ao eixo (ou pony-motor);
- Partida com soft-starter;
- Partida com conversor de frequência (VFD).

Os métodos de partida direta e com tensão reduzida da rede são os tradicionais já amplamente utilizados em motores de indução, a menos da necessidade de excitação para o motor síncrono, tanto para o momento da sincronização como em regime, para manutenção ou controle do seu fator de potência.

A partida por motor auxiliar acoplado ao eixo (ou pony-motor) é uma partida suave, normalmente lenta, onde o conjunto vai tendo a velocidade de rotação incrementada gradualmente pelo motor auxiliar, acoplado à segunda ponta de eixo do motor síncrono. Este método de partida é utilizado principalmente para minimizar o impacto da partida do motor síncrono na rede de alimentação e também em alguns casos para minimizar torques transientes altos ao conjunto mecânico motor-carga.

Este método de partida pode ser realizado utilizando como motor auxiliar um motor de indução de rotor bobinado com reostato líquido, ou um motor de indução de rotor gaiola acionado por conversor de frequência ou até um motor de corrente contínua.

Neste tipo de partida, a carga acionada pelo motor deve possibilitar a partida lenta e incremento gradual da velocidade de rotação, e deve ser realizada com a carga em vazio. Nestes casos a potência do motor auxiliar é bem menor que a potência do motor síncrono, sendo necessária apenas para vencer o torque resistente da carga em vazio acoplada ao motor principal até próximo da rotação nominal. Neste momento o motor auxiliar é desenergizado e é realizada a energização e sincronização do motor síncrono, assumidas pelo sistema de alimentação do estator e do rotor do motor síncrono.

Após a partida do síncrono, com ele operando em regime o motor auxiliar permanece desenergizado, girando acoplado mecanicamente ao eixo do motor síncrono, ou ainda há possibilidade do conjunto possuir um sistema de embreagem entre motor auxiliar e motor principal, que desacopla mecanicamente os eixos de ambos.

A partida com soft-starter nos motores síncronos pode ser realizada com o motor já sincronizado desde rotação zero até a rotação nominal, ou partida assíncrona, com a sincronização realizada próxima da rotação nominal. Nestes casos o sistema de partida é que incorpora ou não essas particularidades, de acordo com as necessidades da aplicação. Após a partida e sincronização a soft-starter é sobreposta pela rede de alimentação e então retirada do circuito, ficando o mesmo alimentado no estator pela tensão e frequência constantes da rede e no rotor pelo sistema de excitação e controle de fator de potência.

A partida com soft-starter normalmente é utilizada para minimizar impactos na rede de alimentação e também na carga, pois ajusta-se o equipamento de partida para demandar corrente limitada da rede e de forma o mais suave possível dentro das necessidades de aceleração da carga que o motor está acionando.

A partida com conversor de frequência em motores síncronos normalmente é aplicada em situações particulares, onde se deseja partida suave com baixo impacto na rede de alimentação, baixos níveis de corrente com níveis de torque adequados à situação ou também onde a aplicação demanda partida controlada desde rotação zero até a nominal, controle fino de velocidade durante a partida, partida e operação com velocidade variável controlada, reversão de rotação ou demais necessidades demandadas pela aplicação.

Vale salientar todas as capacidades e flexibilidades proporcionadas por este método de partida, já amplamente conhecido e utilizado nos motores de indução, sendo que as diferenças dos sistemas para motores síncronos estão relacionadas à necessidade de excitação e o controle integrado da alimentação do estator e do rotor.

Neste método de partida o motor síncrono já parte sincronizado, ou seja, com o campo principal do rotor já alimentado com corrente contínua. E normalmente os conversores de frequência para este tipo de máquina já incorporam os módulos de controle e de potência tanto para o estator como para o rotor do motor síncrono, sendo os dois sistemas já integrados, por necessidade de se controlar conjuntamente tanto a alimentação do estator como a do rotor da máquina.

Uma particularidade para este método de partida com tensão e frequência variáveis são os sistemas

especificados para operar apenas na partida, onde se otimiza o equipamento e se reduz o porte do mesmo, e consequentemente o seu custo, fazendo-o aplicável apenas no instante da partida. Neste caso o equipamento de partida é especificado levando em consideração a potência reduzida requerida pelo sistema motor síncrono e carga acionada em vazio durante a partida, com o tempo de operação limitado ao tempo de partida. Ao final da partida o sistema específico de partida é sobreposto pela rede de alimentação do estator à tensão e frequência constantes e então desconectado da rede, permanecendo com controle apenas da excitação da máquina, realizado no rotor.

21.2 GAIOLA DE PARTIDA

Os motores síncronos possuem uma gaiola de esquilo no rotor, cuja função é acelerar a máquina na partida, já que a partida da máquina síncrona é assíncrona, ou seja, na partida o comportamento do motor síncrono é o mesmo de um motor assíncrono de indução.

Basicamente, o princípio é o mesmo do motor assíncrono de indução, onde o campo girante produzido pela alimentação trifásica do estator induz corrente nas barras da gaiola do rotor, inicialmente em repouso (situação de escorregamento máximo). A corrente circulando nas barras do rotor por sua vez produz um campo que interage com o campo girante do estator, onde o resultado é o torque acelerante no rotor, tirando a máquina da inércia.

À medida que o rotor acelera, tendendo a acompanhar a velocidade de rotação do campo girante, a corrente induzida no rotor diminui e a interação entre o campo produzido pelas barras da gaiola do rotor e o campo girante também diminui, fazendo com que o escorregamento vá diminuindo. E próximo da velocidade síncrona o enrolamento de campo no rotor do motor síncrono é energizado, formando os polos norte e sul do rotor, sincronizando-os com o campo girante, fazendo assim o rotor girar exatamente na mesma velocidade de rotação do campo girante. Nessa condição o escorregamento é zero.

Com o rotor operando na velocidade síncrona em regime, não há efeito de corrente induzida nas barras da gaiola do rotor devido ao escorregamento ser zero, o que faz com que em regime contínuo a gaiola do rotor do motor síncrono não desempenhe função.

No entanto, nos momentos de oscilações bruscas de carga, instantaneamente é forçado escorregamento diferente de zero no motor, o que faz com que a gaiola responda também instantaneamente às oscilações. Nestes momentos a gaiola do rotor do motor síncrono contribui positivamente com a manutenção da sincronização e a minimização das oscilações.

Portanto a gaiola de esquilo presente no rotor do motor síncrono é dimensionada especificamente para operar na partida e em possíveis oscilações de carga da máquina durante operação em regime. Ao contrário da gaiola dos motores de indução, que pelo próprio princípio de funcionamento destes, é dimensionada tanto para a condição de partida como para a condição de operação, necessitando atender adequadamente às duas situações.
Devido essa especificidade da gaiola de esquilo dos motores síncronos, a condição de partida desse tipo de máquina pode ser ajustada durante o projeto da máquina de acordo com as particulares da carga a ser acionada pelo motor, do método de partida utilizado e das condições de operação. Daí a importância em se conhecer desde a fase de concepção da máquina essas informações, pois dessa forma a máquina pode ser otimizada exatamente à condição de operação para a qual será concebida.

Também por este motivo, nos casos onde um motor síncrono existente seja utilizado para acionar uma carga diferente da qual acionava originalmente, é muito importante a análise da partida e das características da máquina, para se certificar de que o motor síncrono poderá acionar a nova carga adequadamente.

Os motores síncronos de polos lisos possuem a gaiola de esquilo do rotor alojada em ranhuras específicas no pacote de chapas do rotor, em todo o perímetro do mesmo e simetricamente distribuída na periferia do rotor. Esta gaiola é tipicamente fabricada em cobre ou latão, dependendo das características e especificidades de partida da máquina.
As barras são dispostas simetricamente na periferia do pacote de chapas do rotor e curto-circuitadas nas extremidades do pacote através de chapas extremas ou anéis, formando assim a gaiola.
A simetria da gaiola proporciona curva de torque suave e menor torque pulsante durante a partida.

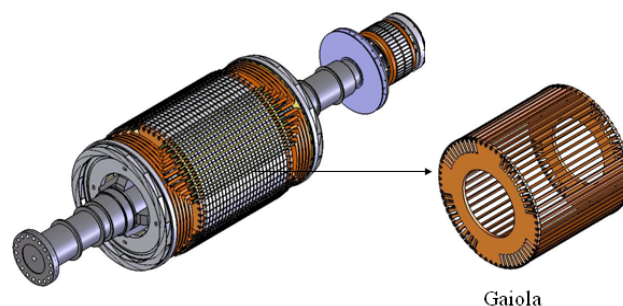



Figura 21.1: Polos lisos – gaiola simétrica do rotor

Os motores síncronos de polos salientes laminados possuem as barras da gaiola de esquilo do rotor alojadas nas sapatas polares e curto-circuitadas nas extremidades através de segmentos dos anéis de curto-circuito, formando dessa forma, em cada polo, um segmento da gaiola completa. Os segmentos da gaiola em cada polo são conectados entre si formando os anéis de curto-circuito completos e consequentemente a gaiola completa do rotor desse tipo de máquina.

Nessa configuração de rotor, as barras da gaiola de curto-circuito não são dispostas simetricamente na periferia do rotor, possuindo assim concentração de barras nas regiões dos polos e ausência de barras nas regiões entre polos.
A assimetria da gaiola desse tipo de máquina contribui para uma curva de torque da máquina com menor suavidade e também, aliada à saliência dos polos, maior torque pulsante durante a partida, se comparado aos motores síncronos de polos lisos.

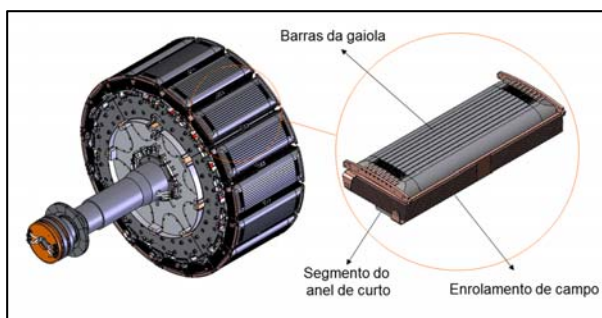



Figura 21.2: Polos salientes laminados – gaiola do rotor

Os motores síncronos de polos salientes sólidos não possuem gaiola de esquilo no rotor. As sapatas polares durante a partida comportam-se como se fossem uma gaiola. O efeito da corrente de Foucault provocado pelo campo girante na superfície das sapatas polares durante a partida produz correntes elevadas nessas regiões. Tais correntes produzem campos eletromagnéticos elevados que interagem com o campo girante produzido pelo estator, resultando no torque de partida da máquina.

A circulação de altas correntes de Foucault nas sapatas polares ocasiona altas temperaturas nessa região, que no projeto da máquina também devem ser avaliadas, com relação ao material das próprias sapatas, materiais isolantes e de fixação dos enrolamentos de campo e também a forma de arrefecimento dos polos.

A configuração das sapatas polares desse tipo de motor pode ser ajustada durante o projeto do mesmo, com objetivo de ajustar corrente de partida e torque de partida da máquina, otimizando-a à carga a ser acionada, ao método e às condições de partida requeridos pela aplicação do motor.

Nessa configuração de rotor, devido aos efeitos que se manifestam nas sapatas polares durante a partida e ao próprio princípio de obtenção do torque de partida, obtém-se altos níveis de torque na partida com baixos níveis de corrente, que podem ser ajustados de acordo com a configuração das sapatas polares durante a fase de projeto da máquina.

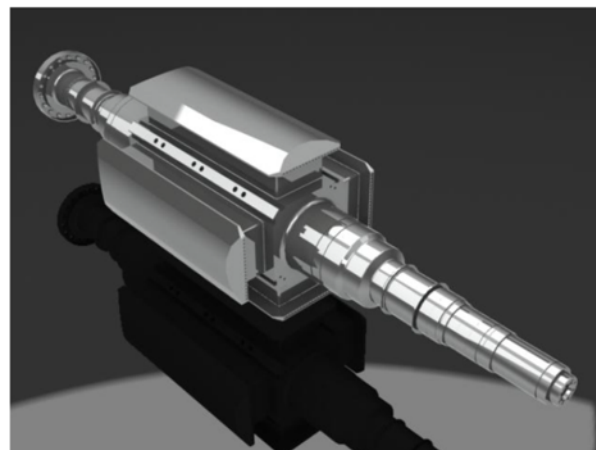



Figura 21.3: Polos salientes sólidos

22 APLICAÇÃO DE CAMPO (PARTIDA)

O método mais comum de se partir o motor síncrono é como se este fosse um motor assíncrono de gaiola e depois excitá-lo, alimentando o enrolamento de campo com corrente contínua, a fim de sincronizá-lo.

Conecta-se a armadura a uma rede de tensão alternada e esta induz na gaiola do motor uma corrente induzida, a qual gera o conjugado de partida como um motor assíncrono. O rotor acelera até próximo à velocidade síncrona, sem contudo atingi-la. Quando a velocidade do rotor é cerca de 95% da velocidade síncrona, o enrolamento de campo é alimentado com corrente contínua. O campo magnético criado pelo enrolamento de campo entrelaça-se com o campo magnético girante da armadura, gerando o conjugado de sincronismo (pull-in-torque) e fazendo com que o rotor acompanhe o campo girante de armadura (estator), movimentando-se à velocidade síncrona. Este fenômeno transitório é chamado "sincronização".

Para garantia da partida e sincronismo do motor síncrono, a análise da curva de conjugado de partida do motor deve ser sempre acompanhada pela análise da curva de conjugado resistente da carga e das inércias do motor e carga.

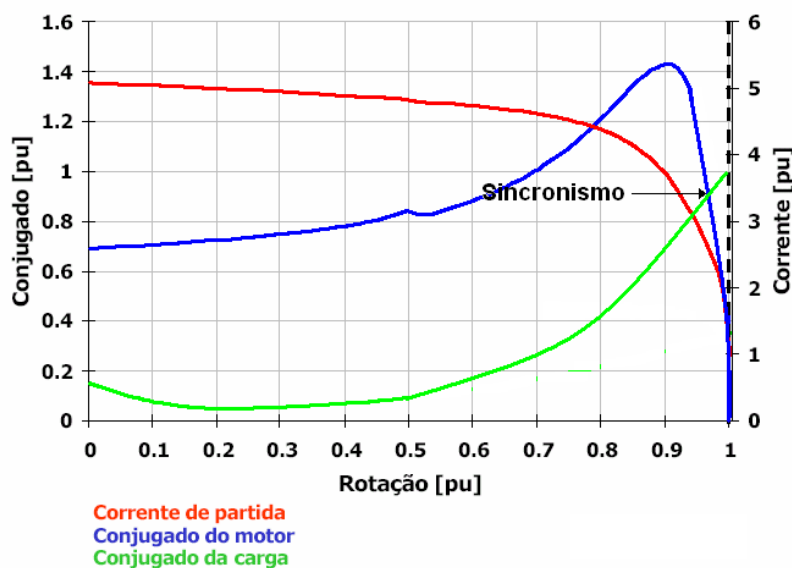



Figura 22.1: Curva de conjugado e corrente x rotação

A alimentação do campo principal com corrente contínua pode ser feita diretamente através de escovas e anéis coletores (excitação com escovas) ou sem escovas (excitação brushless).

Nos motores Com Escovas, utiliza-se um relé de aplicação de campo, o qual está instalado em um painel de excitação fora do motor para chavear a tensão em corrente contínua no campo no momento adequado.

Nos motores Brushless (sem escovas), utiliza-se um circuito eletrônico de disparo instalado junto da “roda de diodos”, fixo ao rotor (chamado também de dispositivo de chaveamento de campo).

A partida do motor síncrono é feita com enrolamento de campo (excitação) curto-circuitado e com o induzido (armadura) conectado à rede. Curto circuita-se o enrolamento de campo com o objetivo de evitar a indução de tensões muito altas em suas espiras, o que provocaria a perfuração do isolamento.

22.1 DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO DE CAMPO

22.1.1 Controle por tensão

O circuito ilustrado na Figura 22.2 funciona da seguinte forma:

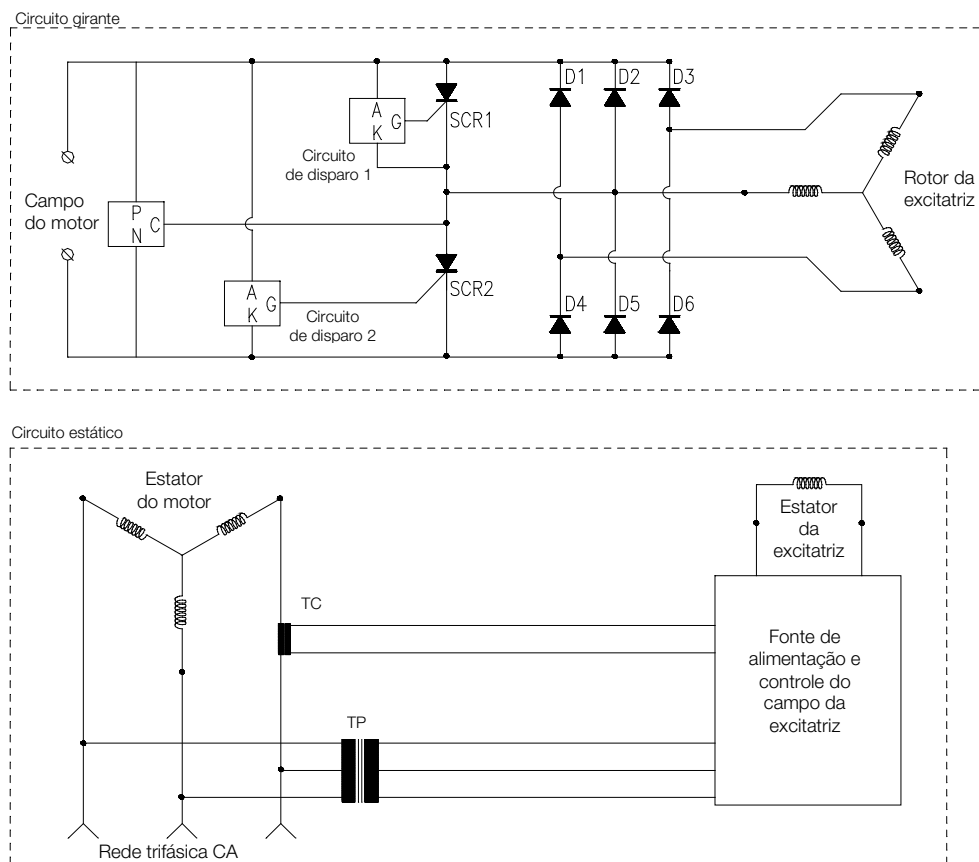



Figura 22.2: Circuito de disparo com controle pela tensão

Durante a operação normal do motor, o rotor da excitatriz e os diodos D1-D6 geram tensão CC retificada para fornecer corrente de campo ao motor de acordo com a corrente de campo da excitatriz fornecido por uma fonte externa controlada.

Durante a operação normal, os tiristores SCR1 e SCR2 não estão conduzindo.

Durante a partida do motor, o campo rotativo gerado pelo estator do motor induz uma tensão alternada muito alta no enrolamento de campo do motor que e proporcional a relação entre o número de espiras do estator/rotor e o escorregamento.

Para evitar danos ao sistema de isolamento e aos outros componentes do rotor, o retificador da excitatriz oferece um caminho de baixa impedância para a corrente que reduz a tensão induzida para níveis toleráveis fazendo com que a corrente não circule pelo enrolamento da armadura da excitatriz.

Quando a corrente induzida de campo estiver no sentido positivo, a ponte de diodos desviara a corrente de campo induzida com uma pequena queda de tensão.

Quando a corrente induzida de campo estiver no sentido negativo, a tensão alternada do enrolamento de campo é positiva através dos tiristores SCR1, SCR2 e nos circuitos de disparo.

O circuito é disposto de forma que os circuitos de disparo identifiquem a tensão completa. Na medida em que a tensão alternada aumenta, os circuitos de disparo fazem os SCRs conduzirem.

O nível de tensão dos circuitos de disparo é especificado para ser suficiente acima da tensão de campo normal de operação.

Quando o motor se aproxima da rotação síncrona, o valor da tensão de campo induzida e a frequência desta tensão se aproximam de zero.

A tensão do campo da excitatriz, que até este momento foi mantida desaplicada pela fonte de tensão e controle externa, pode agora ser aplicada aumentando a tensão CC da excitatriz aos níveis de operação.

Se os tiristores SCR1 e SCR2 estiverem conduzindo quando a excitatriz tiver uma tensão significante, a conexão entre o cruzamento de SCR1 e SCR2 e a fase AC da excitatriz permitirá o desligamento dos tiristores quando a corrente induzida de campo do motor não for mais negativa.

22.1.2 Controle pela frequência

O circuito ilustrado na Figura 22.3 funciona da seguinte forma:

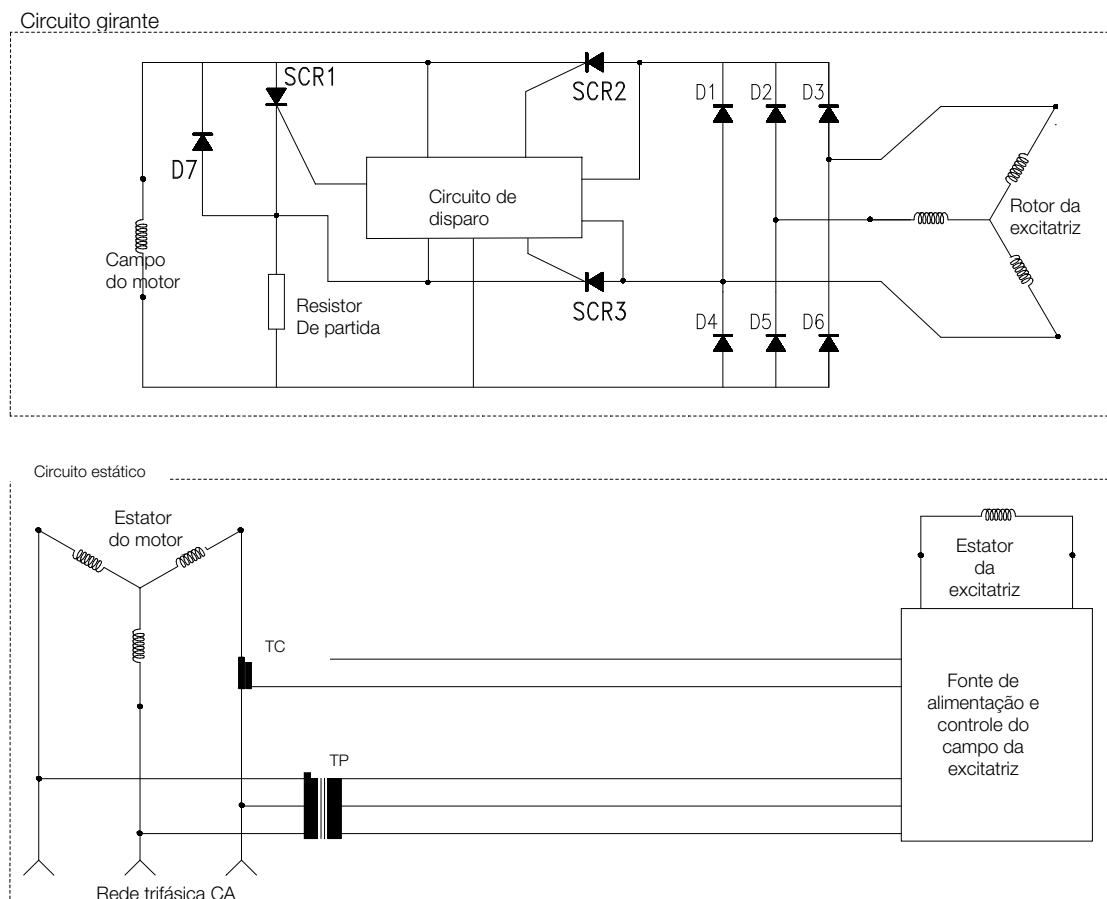



Figura 22.3: Circuito de disparo com controle pela frequência

O campo da excitatriz deve ser energizado durante a partida do motor, assim que o disjuntor do motor é fechado. Isto permite que a tensão de saída da excitatriz aumente com o aumento da velocidade do motor. SCR2 não está conduzindo.

Quando a corrente de campo induzida estiver no sentido positivo, a corrente circula através do resistor de partida e do diodo D7.

Quando a corrente de campo induzida estiver no sentido negativo, o tiristor SCR1 estará inicialmente bloqueado. A tensão aumenta rapidamente até que o controlador acione o SCR1 e neste momento a corrente de sentido negativo circula através do SCR1 e o resistor de partida.

Próximo da rotação síncrona, o tiristor SCR2 e acionado continuamente, de modo que, mesmo se o motor esteja com carga leve e a aceleração até a rotação nominal ocorra antes que o controle possa reagir durante um semi-ciclo positivo, a tensão de campo será aplicada.

O tiristor SCR3 fornece um circuito de desligamento para SCR1 no caso de uma interferência transitória acionar o resistor de partida durante a operação normal. O controle do motor percebe uma tensão continua no resistor de partida e aciona o SCR3. SCR3 fornece um caminho alternativo temporário para a corrente desviando de SCR1 permitindo que SCR1 seja desligado. Quando a fase da excitatriz conectada ao SCR3 já não está fornecendo corrente para o resistor de partida, SCR3 retorna ao seu estado normal de bloqueio.

22.1.3Excitação para excitatriz CA

O circuito ilustrado na Figura 22.4 é utilizado em motores síncronos sem escovas com excitatriz CA para acionamento por inversor de frequência funciona da seguinte forma:

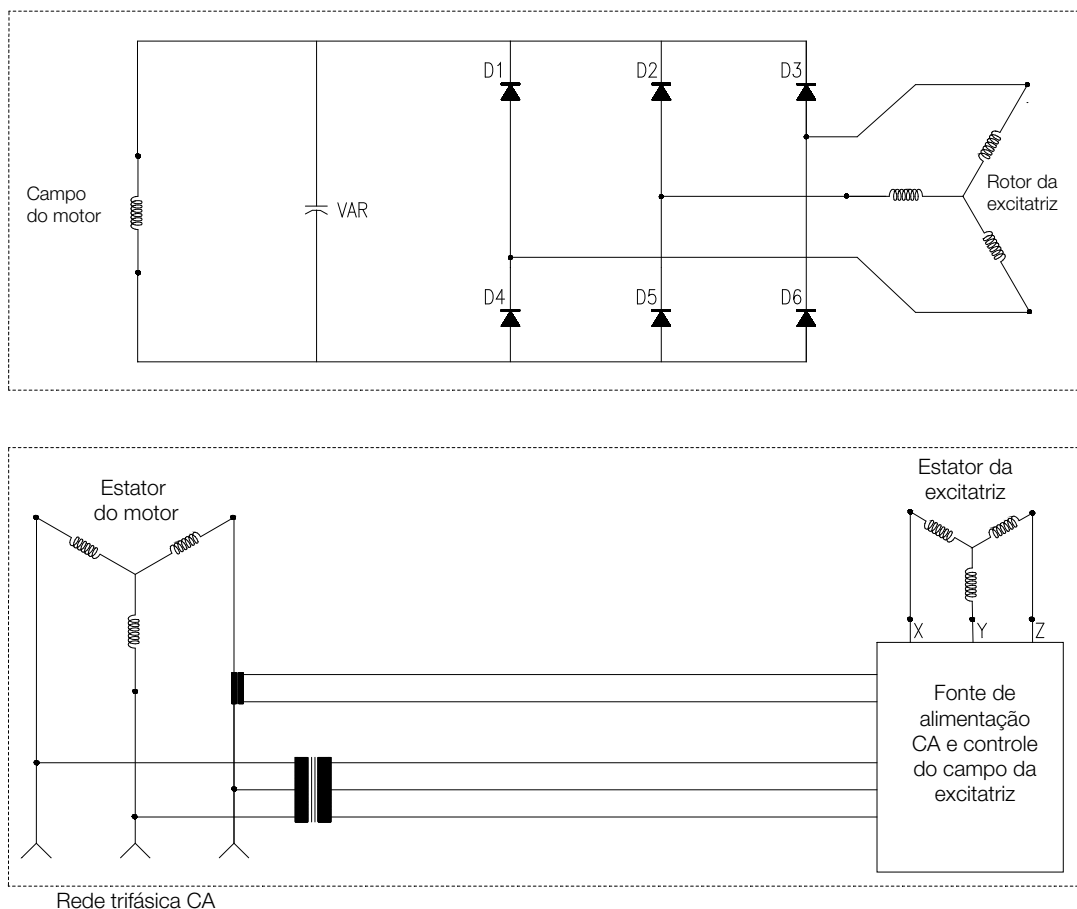



Figura 22.4: Circuito de disparo para excitatriz CA

Durante a operação normal, o rotor da excitatriz e os diodos D1 – D6, que estão fixados no eixo do motor, geram uma tensão CC retificada para fornecer corrente de campo ao motor de acordo com a corrente de campo da excitatriz fornecida separadamente por um drive de excitatriz em corrente alternada.

Durante a operação do motor, o campo rotativo do estator da excitatriz induz uma tensão alternada no rotor da excitatriz, mesmo quando o motor estiver completamente parado. A excitação do campo é controlada pelo controle da excitatriz através da amplitude da tensão.

A sequência de fase da excitatriz CA faz o com que o escorregamento poderá aumentar de 1 até normalmente 3 na rotação máxima. Esta e a razão pela qual o campo rotativo aplicado no estator da excitatriz deve girar no sentido contrário ao sentido de giro do motor.

Se o campo rotativo tiver o mesmo sentido de giro do motor e eles tiverem a mesma rotação, então a tensão e a corrente induzida no rotor da excitatriz será zero.

Este tipo de configuração de retificador é aplicado somente para partida utilizando inversor de frequência.

23 CARACTERÍSTICAS DE PARTIDA DOS MOTORES SÍNCRONOS

Outra vantagem na utilização dos motores síncronos é a sua característica de partida, sendo possível projetar um motor com altos torques e baixas correntes de partida sem prejudicar as características em regime. Isso se faz, pois a armadura apresenta a gaiola de partida, sendo a mesma responsável pelas características de partida do motor, enquanto que em regime (rendimento, fator de potência), as características são definidas pelo campo. Sendo assim, a combinação de alto conjugado com baixa corrente de partida pode ser mais bem atendida pelo motor síncrono. No caso de motores assíncronos, essa alteração de projeto impacta diretamente nas características de operação nominal do motor.

Grandes moinhos de bolas para minério de ferro e moagem de cimento e compressores são alguns exemplos de aplicações onde é requerido alto conjugado de partida e como há limitações do sistema de alimentação, normalmente é desejável que o projeto atenda a baixas correntes de partida (rotor bloqueado). A redução da corrente de partida, normalmente pode ser alcançada por um projeto especial dos enrolamentos do estator e amortecedor. A opção de partida com redução de tensão, também é uma alternativa utilizada para reduzir a corrente, porém com redução do conjugado.

23.1 DEFINIÇÕES

Termos utilizados para motores síncronos segundo norma NEMA MG-1:

Full-load Torque

É o conjugado necessário para produzir a potência nominal do motor na rotação nominal;

Pull-in Torque – Torque de Sincronização

É o máximo conjugado constante sob o qual o motor colocará a inércia da carga conectada a ele em sincronismo, com tensão e frequência nominais, quando a excitação de campo está sendo aplicada.

Pull-out Torque – Torque Máximo em Sincronismo

É o máximo conjugado contínuo no qual o motor manterá velocidade síncrona com tensão e frequência nominais e com excitação normal, mesmo no caso de sobrecargas momentâneas.

Locked-rotor Torque

É o mínimo conjugado com o qual o motor ficará em repouso para todas as posições angulares do rotor, com tensão e frequência nominais aplicadas a ele.

Breakdown Torque

É o máximo conjugado que o motor desenvolverá com tensão e frequência nominal, sem queda abrupta na velocidade.

23.2 TORQUE PULSANTE

O torque pulsante gerado na partida de máquinas síncronas ocorre devido às saliências dos polos, pois o torque durante a partida oscila em torno de um valor médio com frequência igual ao dobro do escorregamento (conforme Figura 23.1) e a sua magnitude é determinada pelo grau de assimetria do circuito do rotor. Essa assimetria também causa uma queda no torque médio quando o rotor atinge velocidade superior à metade da velocidade síncrona. Isto se deve à componente de sequência negativa de fluxo de entreferro interagindo com o estator, gerando torque resistivo.

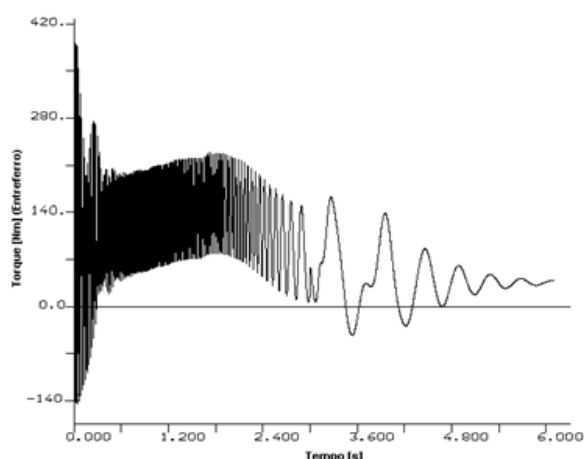



Figura 23.1: Curva de torque pulsante vs tempo

Os enrolamentos de campo que envolvem somente o eixo direto do rotor, também é responsável por gerar o torque pulsante. Para o motor síncrono com o campo excitado, a geometria eletromagnética do rotor se repete uma vez a cada dois polos, sendo mais um grau de assimetria. Por esses motivos a partida do motor é feita geralmente com os enrolamentos de campo curto-circuitado ou é conectado um resistor aos seus terminais. Caso o campo seja excitado prematuramente na partida, gera-se uma grande componente de torque pulsante na frequência de escorregamento, podendo tornar impossível a chegada ao sincronismo.

A Figura 23.2 descreve o comportamento do torque assíncrono e o torque pulsante em função da rotação do motor síncrono, durante a partida assíncrona.

Figura 23.2: Curva de torque assíncrono e torque pulsante vs rotação

24 VANTAGENS E CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES SÍNCRONOS

Os motores síncronos são largamente utilizados na indústria, pois suas aplicações, na maioria das vezes, resultam em vantagens econômicas e operacionais consideráveis ao usuário devido às suas características de funcionamento. Podemos citar como vantagens o alto rendimento, a capacidade de controlar o seu próprio fator de potência e inclusive realizar a correção do fator de potência do sistema ao qual estão conectadas, as características especiais de partida e a velocidade constante mesmo que com variação brusca da carga.

24.1 ALTO RENDIMENTO

Embora o custo inicial para instalação/aquisição seja maior, em muitos casos, ganhos superiores podem ser obtidos pelos baixos custos operacionais do motor síncrono. Quando o rendimento do motor torna-se a consideração básica na escolha do motor, um motor síncrono com fator de potência (FP) unitário (1.0) é usualmente a solução.

Uma vez que potência reativa (KVAR) não é necessária, e sim somente potência ativa (KW), a corrente de armadura é minimizada, resultando em menor perda I^2R no enrolamento do estator. Também, uma vez que a corrente de campo requerida é a mínima praticável, haverá menor perda I^2R no enrolamento de campo da mesma forma. A baixa perda em ambos os enrolamentos de estator e de campo permitem ao motor síncrono com FP 1.0 operar em melhores condições térmicas que motores síncronos com FP 0.8 de mesma potência.

Assim, os rendimentos do motor síncrono FP 1.0 são geralmente superiores aos do motor de indução de potência correspondente. A Figura 24.1 mostra valores orientativos de rendimentos nominais para motores síncronos FP 1.0 e FP 0.8 para motores de alta rotação, assim como os de motores de indução.

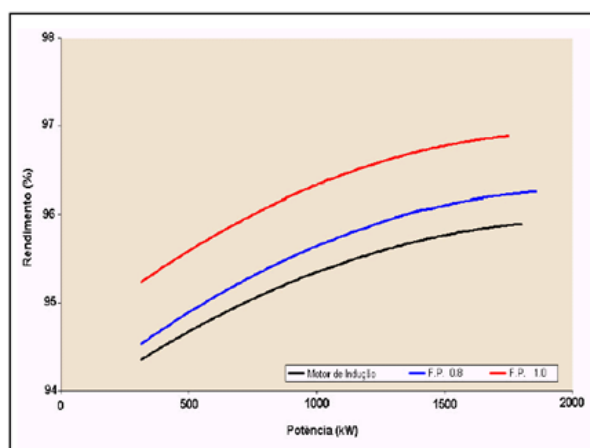



Figura 24.1: Comparativo entre os rendimentos dos motores síncronos com FP=0.8, FP=1.0 e motores de indução.

24.2 VELOCIDADE CONSTANTE

Independentemente das variações de carga e desde que a carga se mantenha dentro da limitação do conjugado máximo (pull-out) do motor, a rotação média do motor síncrono se mantém constante. Isto se verifica pelo fato dos pólos do rotor permanecer travados em relação ao campo magnético girante produzido pelo enrolamento do estator.

Desta forma o motor síncrono mantém a velocidade constante tanto nas situações de sobrecarga como também durante momentos de queda de tensão, respeitando-se os limites do conjugado máximo (pull-out). Em certas aplicações, como em máquinas de moinho de polpa de papel, a velocidade constante resulta na uniformidade superior e qualidade do produto produzido.

24.3 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Os sistemas de potência de energia elétrica são baseados não somente em potência ativa em kW, mas também no fator de potência na qual ela é fornecida.

Penalidades são aplicadas ao consumidor, quando o fator de potência da carga está abaixo de valores especificados. Estas penalidades (multas) ocorrem devido ao fato de que baixo fator de potência representa um aumento da potência reativa (kVAr) requerida e consequentemente, num aumento dos equipamentos de geração e transmissão de energia elétrica. Então a legislação estabelece limites para o fator de potência nas indústrias evitando assim este aumento da potência reativa (kVAr).

Nas indústrias, geralmente predominam as cargas reativas indutivas, que são os motores de indução de pequeno porte ou de rotação baixa, transformadores, entre outros equipamentos as quais requerem considerável quantidade de potência reativa (kVAr) consumida como corrente de magnetização. Para suprir a necessidade da rede de potência reativa, além da possibilidade de utilização de bancos de capacitores, os motores síncronos são frequentemente utilizados com esta finalidade.

Por possuírem fonte separada de excitação, os motores síncronos podem aumentar a potência, sem geração de potência reativa (motor com fator de potência unitário), ou gerar potência reativa necessária (motor com fator de potência 0.8).

Desta forma, o motor síncrono, dependendo da aplicação, pode fornecer a potência útil de acionamento necessária e corrigir o fator de potência do sistema, conforme Figura 24.2, pois há a possibilidade de operarem com fator de potência unitário, possibilitando aumento da potência ativa sem aumento de potência reativa ou gerar potência reativa necessária para melhorar o Fator de Potência total do sistema, operando com fator de potência 0.8 capacitivo, por exemplo.

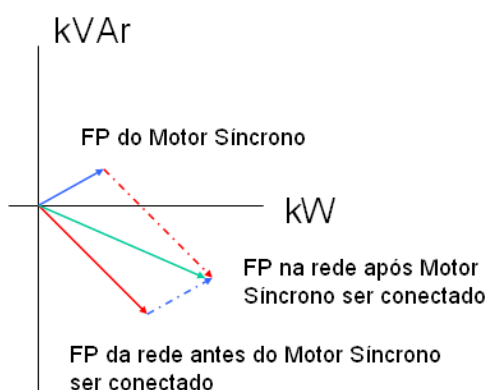



Figura 24.2: Correção do fator de potência do sistema com a utilização de motores síncronos

24.4 COMPENSADORES SÍNCRONOS

Como visto anteriormente, o motor síncrono, devido possibilitar o ajuste do seu fator de potência através da excitação, ao mesmo tempo em que aciona uma carga mecânica em seu eixo (fornecendo potência ativa - W), pode também fornecer ou absorver potência reativa (VAr) ao sistema onde está conectado. E com isso pode ser utilizado para a correção do fator de potência desta instalação.

Uma aplicação particular do motor síncrono em sistemas de geração e distribuição de energia é o Compensador Síncrono.

Figura 24.3: Compensador síncrono WEG 100 MVAr

O Compensador Síncrono é um motor síncrono conectado à rede, operando em vazio (sem carga mecânica no eixo - W), e trocando apenas potência reativa (VAr – tanto capacitiva como indutiva) com o sistema. Essa possibilidade de variação da potência reativa fornecida ou absorvida do Compensador Síncrono com a rede, da mesma forma como no motor síncrono, também é realizada através de atuação na excitação da máquina.

No Compensador Síncrono, a máquina consome do sistema apenas uma pequena parcela de potência ativa (W), o suficiente para suprir as suas perdas internas (atrito, ventilação, aquecimento, etc), já que não há carga mecânica sendo acionada pelo eixo. E através da excitação ele troca potência reativa com o ponto do sistema onde está conectado.

Com isso o Compensador Síncrono é enxergado pelo sistema como se fosse um capacitor (quando sobrexcitado) ou um indutor (quando subexcitado), ambos variáveis através do nível de excitação da máquina.

24.4.1 Como o Compensador Síncrono é utilizado em um sistema elétrico.

Os sistemas de energia são cada vez mais carregados com cargas elétricas variáveis, equilibradas ou desequilibradas, e que consomem grandes parcelas de potência reativa. Este tipo de carregamento normalmente causa variações bruscas de potência reativa, baixo fator de potência, flutuações de tensão, harmônicos, os quais ocasionam efeitos indesejáveis nos sistemas, como sobrecarga da transmissão, fluxo indesejável de potência, aumento de perdas, distorção na tensão, sobreaquecimento e diminuição da eficiência de equipamentos provocando mau funcionamento ou até dano.

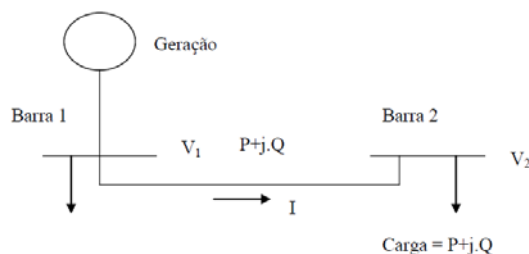



Figura 24.4: Balanço de potência ativa e reativa num sistema simples de duas barras

Em sistemas elétricos de geração e transmissão com geração e cargas distribuídas, com interligações e cargas alimentadas por meio de linhas de transmissão (representado pela Figura 24.4), as variações na potência ativa (P / W) afetam pouco a magnitude da tensão nas barras. Já as variações na potência reativa (Q / VAr) afetam diretamente a magnitude da tensão nas barras.

A potência reativa com característica indutiva provoca diminuição na magnitude da tensão nas barras. E a potência reativa com característica capacitiva provoca a elevação na magnitude da tensão nas barras.
A diferença na magnitude da tensão entre barras ocasiona fluxo de potência reativa entre barras.

Importante salientar que nos sistemas elétricos a busca contínua é por minimizar perdas e disponibilizar para consumo a máxima potência ativa disponível, sob valor nominal de tensão.

A solução para minimizar ou corrigir os problemas causados pelo fluxo de potência reativa e a variação na magnitude das tensões é atuar em pontos específicos do sistema elétrico visando controlar a potência reativa (capacitiva ou indutiva), e consequentemente levar a magnitude das tensões aos níveis adequados ao sistema.

A forma mais básica de se atuar em pontos do sistema para se controlar potência reativa e magnitude de tensão é inserindo ou retirando capacitores ou indutores

(reatores) nestes pontos à medida em que haja necessidade. No entanto a inserção ou retirada desses equipamentos não é tão simples assim, pois pode causar distúrbios, oscilações e efeitos indesejáveis no sistema. Por isso há necessidade de todo um conjunto de equipamentos e configurações adicionais para se implementar essas soluções.
O Compensador Síncrono cumpre essa função com vantagem, pois além de possibilitar a conexão suave e em uma única vez no sistema, através da atuação na sua excitação ele pode apresentar característica indutiva ou capacitiva, variáveis suavemente e dinamicamente, de acordo com a demanda de reativos necessária no sistema.
Dessa forma os Compensadores Síncronos conectados em pontos específicos dos sistemas elétricos são ferramentas ideais para controlar potência reativa, ajustando com isso a magnitude da tensão adequadamente às cargas, à transmissão e ao fluxo de potência reativa dentro dos limites aceitáveis pelo sistema.

Figura 24.5: Compensador síncrono conectado no sistema elétrico

As principais vantagens da utilização de Compensadores Síncronos são:

- Flexibilidade de operação em todas as condições de carga do sistema elétrico, fornecendo de uma maneira contínua, dinamicamente e com variações suaves, potência reativa (VAr) para a rede nas condições de queda de tensão devido ao aumento de carga e absorvendo potência reativa (VAr) da rede nas situações de aumento da tensão devido à redução da carga;
- Estabilização da tensão de maneira suave, sem necessidade de chaveamentos;
- Possibilita ajuste do nível de tensão em pontos do sistema elétrico otimizando a capacidade de transmissão e o fluxo de potência;
- Realização de compensação de reativos sem introdução de harmônicos significativos;
- Contribui positivamente com a estabilidade e equilíbrio ao sistema elétrico;
- Evita que geradores conectados ao sistema elétrico trabalhem com tensão de geração próxima de seus valores limites;
- Evita variação constante em taps de transformadores elevadores do sistema elétrico;
- Reduz o número de manobras com capacitores, reatores ou manobras de linhas de transmissão quando estes são necessários para corrigir o valor da tensão do sistema elétrico;
- Facilidade de ajuste de tensão através do ajuste da excitação, com uma atuação bastante simples e rápida, evitando uma série de outras manobras que seriam necessárias para se conseguir o mesmo efeito e onde se envolveriam mais equipamentos, maior comunicação entre unidades, mais tempo e, consequentemente, maior probabilidade de falhas.

24.5 PAINEL DE EXCITAÇÃO

O Painel de controle da excitação pode conter uma variedade de formatos básicos (Microprocessado, Manual, Automático: Reativo constante, Fator de Potência constante). Ele abriga o equipamento de excitação, os sistemas de proteção (Falha de diodo, Perda de sincronismo, Baixo Fator de Potência, Sobrecorrente de excitação e Subcorrente de excitação) e as funções lógicas para a partida. O painel de excitação pode ser usado integrado ao sistema supervisório da planta.

Figura 24.6: Painel de excitação

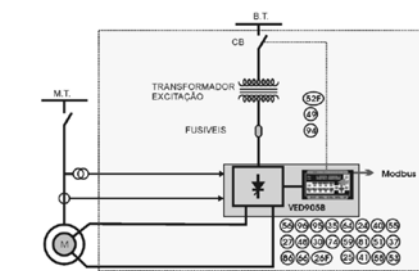
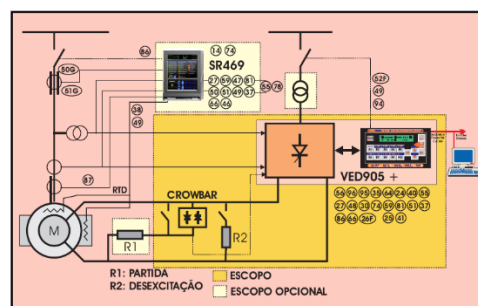



Figura 24.7: Esquemáticos do painel de excitação

25 ORIENTAÇÃO PARA SELEÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS

25.1 LINHA “S”

A linha de motores síncronos “S” é fabricada de 2 a 48 polos, tensões até 13,8kV com potências até 110.000kW, atendendo as exigências das mais diversas normas mundiais.

Códigos dos modelos:

25.2 LINHA “SM40”

A linha de motores síncronos “SM40” é fabricada em 4 polos, tensões até 13,2kV para 60Hz e 11kV para 50Hz com potências de 5 MW até 35 MW. A linha SM40 possui os polos do rotor salientes e maciços, e não possui a gaiola de esquilo. O principal benefício deste tipo de construção é possibilitar um maior torque de partida com níveis de corrente mais baixos que os alcançados pelos rotores laminados e pelos motores de indução.

Figura 25.1: Imagem do motor síncrono SM40

Códigos dos modelos:

Exemplo: SM40-11A01EC

S M 40 11 A 01 E C

Nomenclatura principal

Produto (caractere 1)
Máquina síncrona

Aplicação (caractere 2)
Motor (polos salientes)

Era ou versão (caracteres 3 e 4)

Complemento da Nomenclatura

Carcaça IEC (caracteres 1 e 2)
08 - Carcaça 800
09 - Carcaça 900
10 - Carcaça 1000
11 - Carcaça 1120
12 - Carcaça 1250
00 - Carcaça especial

Código da refrigeração e proteção (caractere 3)

Código	IC	IP
A	81W	44
C	81W	54
E	81W	55
G	01	23
H	01	24
I	86W	55
J	86W	54
K	666	55
L	616	55
M	666	54
N	616	54
X	Especial	

Forma construtiva (caracteres 4 e 5)
01 - IM1001
02 - IM1005
00 - Especial

Tipo de excitação (caractere 6)
E - Brushless sem PMG
F - Brushless com PMG
D - Estática

Tipo de carga (caractere 7)
C - Compressor
R - Refinador
X - Especial

26 CARACTERÍSTICAS CONTRUTIVAS DOS MOTORES SÍNCRONOS

Os motores síncronos WEG podem ser fabricados nas formas construtivas V1, B3, D5 ou D6 e com mancais de rolamentos lubrificados a graxa ou mancais de deslizamento lubrificados a óleo.

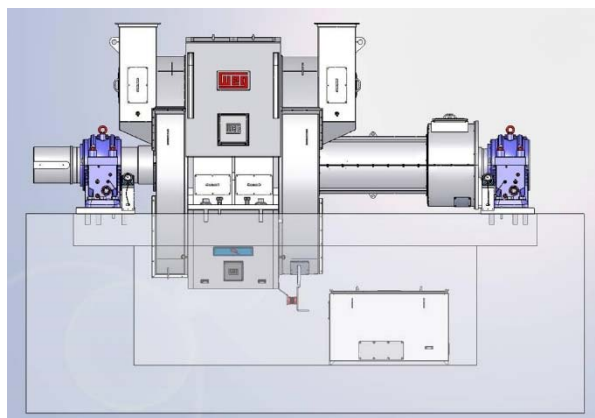
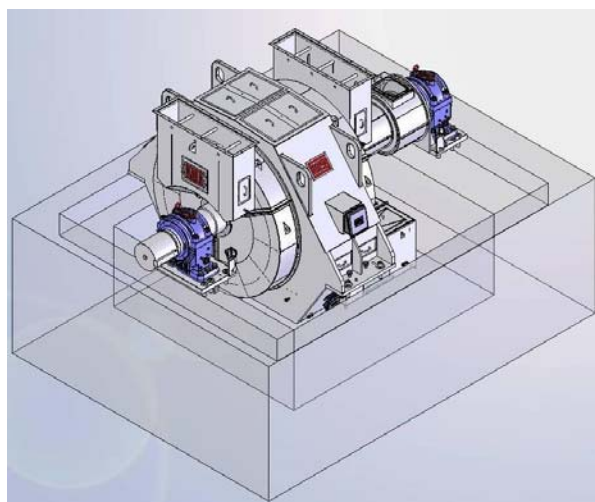
Os mancais de deslizamento podem ser montados em pedestais ou junto às tampas, tornando-se parte integrante do motor.

Motores de baixa polaridade e alta rotação normalmente possuem comprimento do pacote do rotor relativamente longo em comparação com o seu diâmetro.

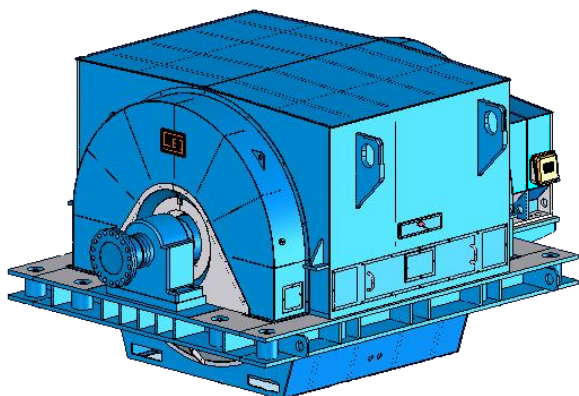
Motores de alta polaridade e baixa rotação, normalmente possuem comprimento do pacote do rotor relativamente pequeno em comparação com o seu diâmetro.

26.1 FORMAS CONSTRUTIVAS USUAIS

- IM 1001 (B3) - Horizontal, dois mancais fixos na tampa e ponta de eixo cilíndrica
- IM 1005 - Horizontal, dois mancais fixos na tampa e ponta de eixo flangeada
- IM 1205 - Horizontal, mancal único fixo na tampa e ponta de eixo flangeada
- IM 3011 (V1) - Vertical, dois mancais fixos na tampa e ponta de eixo cilíndrica (eixo para baixo)

Figura 26.1: Forma construtiva IM 1001 (B3)

26.2 FORMAS CONSTRUTIVAS ESPECIAIS

Motores com mancal de pedestal e intercambiáveis (forma construtiva de acordo à necessidade da aplicação).

Figura 26.2: Formas construtivas D5 e D6 - Mancais de Pedestais

26.3 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS

Os tipos de refrigeração mais utilizados são:

- Motores abertos autoventilados (IC01), Grau de Proteção IP23;
- Motores fechados com trocador de calor ar-ar (IC611), Grau de Proteção IP54 a IP65W;
- Motores fechados com trocador de calor ar-água (IC81W), Grau de Proteção IP54 a IP65W.

Além dos tipos de refrigeração citados, os motores podem ser fornecidos com ventilação forçada, entrada e saída de ar por dutos, e outros meios de refrigeração, sempre atendendo da melhor forma as características de aplicação e do ambiente onde serão instalados.

Motor Síncrono Aberto (Auto-ventilado)

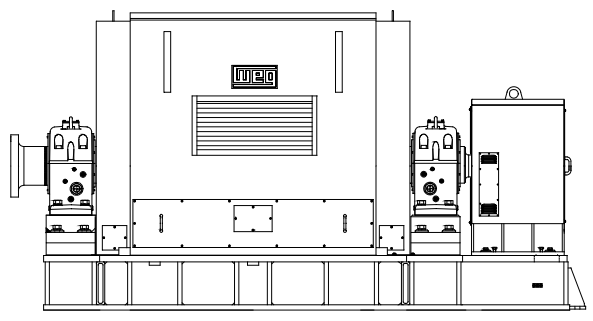



Figura 26.3: Forma construtiva D6

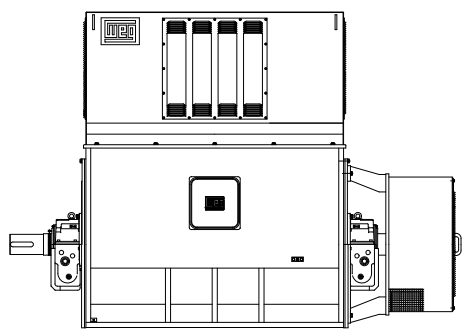



Figura 26.6: Forma construtiva B3

Motor Síncrono fechado com trocador de calor

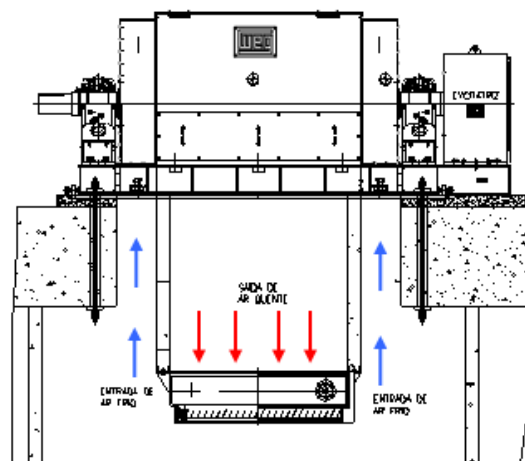



Figura 26.4: Forma construtiva D6

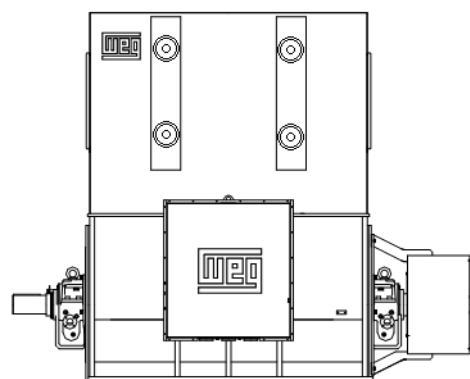



Figura 26.5: Forma construtiva B3

27 ENSAIOS DOS MOTORES SÍNCRONOS

Os motores síncronos produzidos pela WEG são ensaiados de acordo com as mais rigorosas normas vigentes (NBR 5383, IEC 60034, NEMA MG 1 e API) em modernos laboratórios. Em se falando de motores de grande porte estes laboratórios são capacitados para testar os motores de baixa e alta tensão com potência de até 20000 kVA e tensões de até 15.000 V. O laboratório de ensaios da WEG possui um controle de alta precisão, um sistema de monitoramento dos ensaios completamente informatizado além de equipamentos de última geração utilizados nos melhores laboratórios do mundo.

Os instrumentos utilizados passam por um rigoroso procedimento de calibração, com a garantia do padrão WEG de qualidade.

Os técnicos que realizam os ensaios são altamente treinados e possuem diversas certificações para operação dos equipamentos.

Os ensaios realizados podem ser divididos em três categorias: ensaios de rotina, tipo e especiais. Os ensaios de rotinas são realizados em todos os motores fabricados pela WEG Energia. Os ensaios de tipo são normalmente realizados em uma máquina de uma série de motores iguais ou por solicitação do cliente. Os ensaios especiais podem ser realizados quando solicitados. Todos os ensaios fornecidos pela WEG podem ser realizados por solicitação do cliente, com a presença de inspetores ou não.

A seguir estão listados os ensaios disponíveis. Os ensaios não citados, podem ser realizados pela WEG, mediante uma consulta prévia.

27.1 TIPOS DE ENSAIOS

27.1.1 Ensaio de Rotina

- Inspeção visual
- Medição da Resistência Elétrica dos enrolamentos a Frio
- Sequência de Fases
- Medição do Equilíbrio entre Fases
- Medição da forma de onda e da taxa de distorção harmônica
- Saturação em Vazio e em Curto-circuito
- Tensão Aplicada
- Curto-Circuito Trifásico Permanente
- Resistência de Isolamento
- Ensaio com rotor bloqueado
- Inspeção nos acessórios

27.1.2 Ensaio de Tipo

- Ensaios de Rotina
- Elevação de temperatura
- Vibração
- Sobrevelocidade
- Índice de polarização
- Rendimento

27.1.3 Ensaios Especiais

- Curto-Circuito Trifásico Instantâneo
- Curva “V”
- Tensão no eixo
- Vibração no eixo
- Reatância de sequência negativa (X2)
- Reatância de sequência zero (X0)
- Nível de ruído
- Reatância Síncrona de Eixo Direto (Xd)
- Relação de Curto Circuito (Kcc)
- Determinação do Circuito Equivalente

28 SELEÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS

Os Motores Síncronos devem ser especificados segundo sua aplicação, isto é, através de seu regime de trabalho, curva de conjugado resistente e inércia da carga. Estas duas últimas são definições importantes para a análise da partida do motor, enquanto que o regime de trabalho é importante para o dimensionamento térmico em regime.

O Fator de Potência e o tipo de excitação também são características importantes na especificação do motor.

28.1 CONJUGADO RESISTENTE E INÉRCIA DA CARGA

Na especificação de um motor síncrono, é importante se conhecer a carga acionada.

A curva de conjugado resistente e a inércia da carga influenciam diretamente nas características de partida do motor.

Motores Síncronos para acionar cargas de alta inércia são construídos em carcaças maiores para atender as condições de aceleração.

Como o motor síncrono parte através de sua gaiola (como um motor de indução) e com o enrolamento do rotor curto-circuitado (ou fechado numa resistência), a escolha correta do material utilizado na barra amortecedora (geralmente constituído de cobre ou ligas de cobre) e a sua geometria são primordiais para a definição da curva característica de partida do motor.

Esta curva deve ser sempre definida a partir da curva de conjugado resistente da carga.

As barras amortecedoras, além de garantir em partida através do conjugado gerado na gaiola, também devem ser dimensionadas de maneira que possam dissipar o calor gerado durante o processo de partida.

Neste aspecto, a inércia da carga terá uma grande influência sobre o tempo de partida e o calor a ser dissipado pelas barras.

Em princípio, não se pode afirmar que um motor síncrono utilizado em uma determinada aplicação (ex. bomba), possa ser utilizado para o acionamento de uma outra aplicação diferente da primeira (ex. exaustor).

28.2 REGIME DE TRABALHO

A especificação correta da potência nominal do Motor Síncrono deve considerar o ciclo de trabalho do motor com a frequência de sobrecargas que existem no regime.

28.3 FATOR DE POTÊNCIA

Quando se deseja realizar a correção do fator de potência utilizando o motor síncrono, o fator de potência desejado deve ser especificado previamente. Isto significa que um motor projetado para operar com fator de potência unitário, não poderá desenvolver a mesma potência nominal ativa sob um fator de potência inferior. O inverso é possível.

28.4 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE

O ambiente onde o motor será instalado deve ser analisado antes de se especificar o motor.

O tipo de ambiente define o grau de proteção e o tipo de refrigeração do motor.

Ambientes com atmosfera explosiva exigem excitação tipo brushless.

A temperatura ambiente e altitude consideradas para especificação do motor são de 40ºC e 1000m acima do nível do mar.

Se o ambiente de trabalho do motor possuir valores acima destas premissas, é importante que estes dados sejam considerados na especificação.

28.5 ORIENTAÇÃO PARA SELEÇÃO DE MOTORES SÍNCRONOS E DE INDUÇÃO

O gráfico abaixo ilustra de uma maneira simplificada uma relação entre Potência (kW) e velocidade (rpm), o qual orienta na escolha do motor (síncrono ou indução).

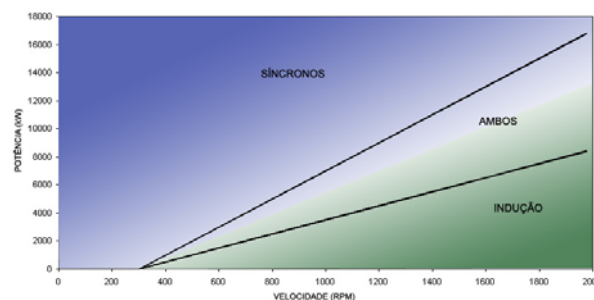



Figura 28.1: Orientação para seleção de motor síncrono ou indução

29 APLICAÇÕES DOS MOTORES SÍNCRONOS

Os motores síncronos WEG são fabricados especificamente para atender as necessidades de cada aplicação.

Devido a suas características construtivas, operação com alto rendimento e adaptabilidade a todos os tipos de ambiente, são utilizados em praticamente todos os segmentos da indústria, tais como:

Mineração (britadores, moinhos, correias transportadoras e outros)

Siderurgia (laminadores, ventiladores, bombas, compressores)

Papel e celulose (picadores, desfibradores, compressores, moedores, descascadores, refinadores e bombas)

Saneamento (bombas)

Química, petroquímica, Óleo & Gás (compressores, ventiladores, exaustores, bombas)

Cimento (britadores, moinhos, correias transportadoras)

Borracha (extrusoras, moinhos, misturadores)

29.1 VELOCIDADE FIXA

As aplicações de motores síncronos com velocidade fixa se justificam pelos baixos custos operacionais, uma vez que apresentam alto rendimento e podem ser utilizados como compensadores síncronos para correção do fator de potência.

Os motores recomendados para esta aplicação são com excitação sem escovas (brushless).

29.2 VELOCIDADE VARIÁVEL

As aplicações de motores síncronos com velocidade variável se justificam em aplicações de alto torque com baixa rotação e larga faixa de ajuste de velocidade.

A construção dos motores para estas aplicações podem ser com ou sem escovas, dependendo das características da carga e ambiente.

Devido ao maior rendimento, tamanho menor e maior capacidade de potência, os motores síncronos podem substituir motores de corrente contínua em aplicações de alta performance.

30 MANUTENÇÃO

A manutenção das máquinas elétricas girantes requer conhecimentos relacionados aos aspectos elétricos e mecânicos. O domínio destas duas áreas é necessário para a manutenibilidade do equipamento como um todo.
Entre os aspectos elétricos, serão abordadas a correta interpretação, especificação e ligação do motor, bem como métodos e técnicas para a recuperação de eventuais danos elétricos, fatores fundamentais para seu perfeito funcionamento e durabilidade.
Entretanto, muitas pessoas ligadas à manutenção de máquinas elétricas girantes pensam apenas em problemas elétricos. Sendo o motor elétrico um equipamento com partes móveis, estará sujeito a todo tipo de problema mecânico tipicamente verificado nestas máquinas. Assim, serão apresentados também tópicos relacionados a aspectos mecânicos, tais como: procedimentos de montagem e lubrificação de mancais de rolamento e deslizamento, características dos lubrificantes, vibração em máquinas elétricas e detalhes relacionados à instalação das máquinas.
Para fins comparativos, enquanto os rolamentos de um carro médio de passeio efetuam cerca de 27 milhões de rotações durante 50.000 km, um motor elétrico de 1800 rpm (4pólos / 60 Hz) operando 24 horas por dia perfaz as mesmas 27 milhões de rotações em apenas 10 dias e 9 horas de operação. Não é surpresa se a maioria dos problemas mecânicos nas máquinas elétricas girantes tiver origem nos rolamentos.
Em função da severidade da aplicação e necessidade de operação contínua, muitas vezes a manutenção básica é deixada em segundo plano. Fatores imprescindíveis para a operação do motor tais como relubrificação, alinhamento, dimensionamento e especificação, se mal elaborados, refletem negativamente no desempenho da máquina. Como consequências, ocorrem quebras e paradas inesperadas.
A manutenção das máquinas elétricas tem diversos aspectos a serem considerados e este trabalho não tem a pretensão de abranger todos estes aspectos, mas indicar os que são considerados mais relevantes.
Com base nesta ideia dividimos os primeiros tópicos indicando os procedimentos mínimos de Manutenção Elétrica e Mecânica aplicáveis a todos os motores e geradores.
Após, conversaremos sobre os tipos de manutenções aplicados a cada momento de operação do equipamento, são elas: Manutenção sensitiva, preditiva, preventiva, corretiva e de melhoria.
Por fim conversaremos sobre aspectos de armazenagem de motores e geradores elétricos e sobre técnicas modernas de serviços em maquinas elétricas rotativas que a WEG oferece ao Mercado.
Desejamos que este seja o início ou continuação de um caminho que percorrido de acordo com métodos e procedimentos adequados, possa trazer resultados satisfatórios sob todos os aspectos de manutenção.

31 MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS E GERADORES DE GRANDE PORTE

Neste item iremos ver os principais testes e procedimentos para verificação e solução de problemas elétricos e mecânicos. Dividimos o capitulo em aspectos elétricos e mecânicos para melhor entendimento, todos os testes e procedimentos aqui descritos serão úteis para start-up, manutenção e solução de problemas em campo para motores síncronos e assíncronos. Ao longo do texto, serão feitas observações específicas sobre determinado tipo de motor quando isto se fizer necessário.

31.1 ASPECTOS ELÉTRICOS

31.1.1 Resistência de isolamento

Finalidade: Verificar a condição do isolamento, quando se deseja um resultado quantitativo e o seu registro.
Procedimento: Para efetuar estas medições se faz necessário o uso de um Megôhmetro, cujo fundo de escala deve ser no mínimo 500V.
Devem-se juntar todos os terminais da máquina e conectar no terminal positivo (+) do aparelho, e o terminal negativo (-) na carcaça do motor. Na prática devem ser feitas leituras aos 30 segundos, 1 (um) minuto e 10 minutos desde a aplicação da tensão. A tensão não deve ser interrompida durante o teste.
Concluindo o ensaio acima, devem-se colocar os terminais do circuito medido em curto-circuito, com cuidado, parados e mantê-los nesta situação durante um tempo igual a 3 vezes a duração do ensaio acima, como preparação para o ensaio seguinte sobre o mesmo equipamento.
Importante: Registros periódicos são úteis para concluir se a máquina está ou não apta a operar.
Em virtude do tempo envolvido para a realização do teste completo, basta fazer a leituras aos 30 segundos e 1 (um) minuto. A leitura de 10 minutos somente será feita quando, a partir das medidas anteriores, for verificada alguma anormalidade no isolamento. Neste caso, uma limpeza das partes com solventes adequados ou secagem pode levá-las a um valor normal.
Para motores de indução com rotor bobinado devem-se levantar as escovas da superfície.
Na tabela abaixo temos os dados que estabelecem os valores limites de resistência de isolamento. Deve se garantir que a máquina esteja seca e limpa (no caso da permanência prolongada em estoque ou desuso).

Tabela 31.1: Valores de referência para resistência de isolamento

Valor da resistência do isolamento	Avaliação do isolamento
2MΩ ou menor	Ruim
< 50MΩ	Perigoso
50...100MΩ	Regular
100...500MΩ	Bom
500...1000MΩ	Muito Bom
> 1000MΩ	Ótimo

31.1.3 Índice de polarização e índice de absorção

Finalidade: Verificar as condições da resistência de isolamento, medindo a isolação do enrolamento em relação à massa metálica do motor.
O motor estando limpo e em boas condições o IP é alto, o motor com sujeira, umidade e/ou graxa na bobinagem, o valor do IP é baixo (Conforme tabela)
Procedimento: Para efetuar esta medição é necessário o uso de um Megôhmetro. Aplicamos tensão contínua do Megôhmetro (2,5KV, ou de acordo com a capacidade do aparelho), e após 1 minuto anotamos o valor da resistência, continuamos com a medição após 10 minutos, anotando o novo valor.

Índice de absorção

$$I_{ab} = \frac{R_{1minuto}}{R_{30segundos}}$$

Índice de polarização

$$I_p = \frac{R_{10minutos}}{R_{1minuto}}$$

Tabela 31.2: Valores de referência para índices de absorção e polarização

Índice de Absorção	Índice de polarização	Avaliação do isolamento
-	1 ou menor	Ruim
Abaixo de 1,1	< 1,5	Perigoso
1,1 a 1,25	1,5 a 2,0	Regular
1,25 a 1,4	2,0 a 3,0	Bom
1,4 a 1,6	3,0 a 4,0	Muito Bom
Acima de 1,6 (1)	> 4,0	Ótimo

31.1.4 Medição de resistência ôhmica

O ensaio de medição da resistência ôhmica se presta a comparar o valor ôhmico do enrolamento com o valor de resistência ôhmica original a fim de detectar alguma deficiência no bobinado.
Para a realização deste ensaio são necessários os seguintes equipamentos:
- Ponte Kelvin ou equipamento com semelhante precisão;
- Termômetro.

A medição da resistência ôhmica deverá ser feita com o motor a frio com temperatura estabilizada. Deve-se registrar o valor da resistência ôhmica (em Ohms) e a temperatura ambiente no instante da medição.
Finalidade: Verificar se o valor da Resistência está equilibrada e/ou de acordo com a especificação de fábrica.
Procedimentos: Devem-se medir as resistências de fase, e verificar o equilíbrio;
Critério: Pelo procedimento interno da WEG o desequilíbrio de resistências não deve ser superior a 3%.

<u>Exemplo:</u>
Temos:

Fase1: 0,125 Ω Fase2: 0,130 Ω Fase3: 0,120 Ω

$$DR = \frac{0{,}130}{0{,}120} - 1(100)$$

$$DR = (1{,}0833 - 1)(100) = 8{,}33\,\%$$

Neste caso temos um valor maior que o limite estabelecido, o motor pode estar com erro na bobinagem.

31.1.5 Surge test

Finalidade: Verificação da condição da bobinas através da comparação das fases. Detecta curto-circuito na bobinagem e erros de ligação.
Procedimento: Deve-se aplicar tensão gradualmente de acordo com os critérios abaixo e observar a forma de onda obtida.
1 – Motores de média tensão (acima de 1000 V/fase): aplicar 2 vezes tensão nominal + 1000V.
2 - Motores de baixa tensão (abaixo de 1000 V/fase): aplicar no mínimo 1500 V e no máximo o valor do exemplo anterior.

Figura 31.1: Ligação dos cabos para ensaio de surge test

Figura 31.2: Operação do equipamento de surge test - elevação gradual de tensão

Critério:
Os critérios para verificação da condição da bobinagem são mostrados nas figuras abaixo: quando for detectada uma falha em um conjunto de espiras, bobinas e fases; as formas de onda apresentadas abaixo caracterizam e identificam aproximadamente o tipo de falha ocorrida.
Pode haver uma variação de motor para motor quanto ao formato das formas de onda apresentadas, devido às diferenças existentes entre motores.

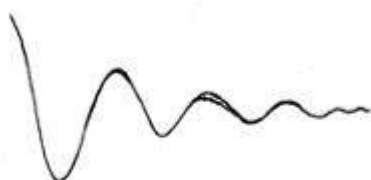



FIGURA 1 - Curto entre Espiras

FIGURA 2 - Curto entre Bobinas de Mesma Fase

FIGURA 3 - Curto Parcial entre Fases

FIGURA 4 - Curto Total entre Fases

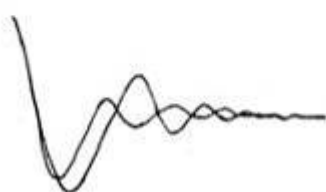



FIGURA 5 - Ligação Imprópria de Bobina

FIGURA 6 - Ligação Invertida de Bobina

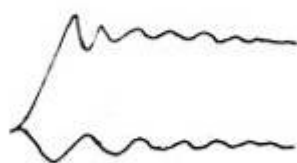



FIGURA 7 - Ligação de Bobina Aberta

FIGURA 8 - Curto Parcial de Massa

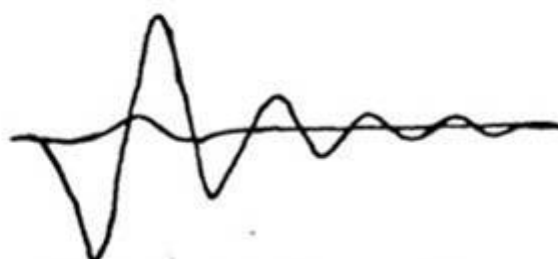



FIGURA 9 - Curto Total para Massa

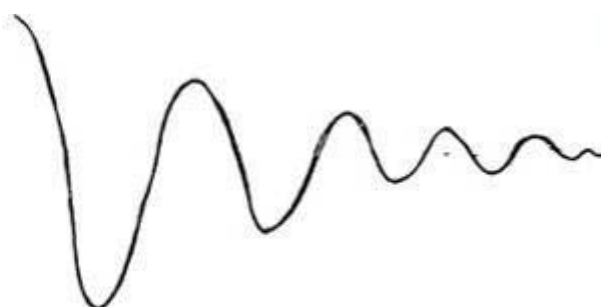



FIGURA 10

Figura 31.3: Formas de onda características do ensaio de Surge Teste

31.1.6 Ensaio de tensão aplicada

Finalidade: O objetivo do Ensaio de tensão aplicada é garantir que o isolamento de uma máquina ofereça segurança aos operadores e à aplicação em que esta está instalada.

Procedimento: Conforme a norma NBR 7094 deve-se aplicar em um motor novo o seguinte valor de tensão aplicada:

Ua = 2xUn + 1000V

Para máquinas parcialmente rebobinadas pode-se aplicar o seguinte valor (acordado entre cliente e fornecedor):

Ua = (2xUn + 1000V) x 0,75

Para máquinas revisadas pode-se aplicar o seguinte valor de tensão (acordado entre cliente e fornecedor):

Ua = 2xUn x 1,5

OBS.: O ensaio de tensão aplicada em máquinas parcialmente rebobinadas deverá ser realizado de comum acordo entre cliente e fornecedor, visto que este ensaio é degradante e estressa violentamente o isolamento.
Este teste não deve ser repetido com frequência, pois danifica o material isolante. É um teste que degrada a isolação.

31.1.7 Teste de corrente em vazio

Finalidade: Verificar a relação de corrente entre as fases e seu equilíbrio.
Procedimentos: Deve-se ligar o motor em vazio na sua tensão e frequência nominais, para isso é necessário um painel de teste ou fonte de alimentação; e verificar o equilíbrio das correntes, conforme equação abaixo:

$$DI = \left(\frac{DMD}{MTF}\right) \times 100$$

Onde:

DI = Desequilíbrio de corrente
DMD = Maior desvio de corrente de fase em relação à média das três fases
MTF = Média das três fases

Causas: O desequilíbrio de correntes pode ser ocasionado em função do desbalanceamento da rede de alimentação, ou da bobinagem incorreta.
Critério: O desequilíbrio não deve exceder ao limite de 10% (DI≤10%);

<u>Exemplo:</u> Motor trifásico MAF500, IV polos, 4160V

I1 = 234 A I2 = 239A I3 = 220 A

$$MTF(média_das_correntes_das_três_fases) = \left(\frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}\right) = \left(\frac{234 + 239 + 220}{3}\right) = 231A$$

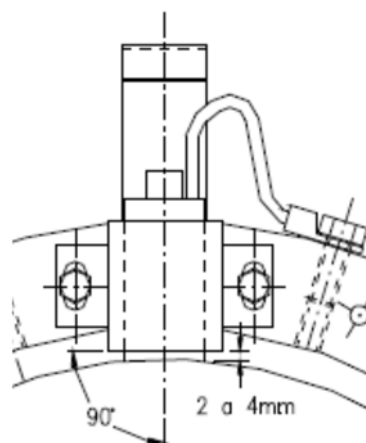
$$DMD = I_3 - MTF = 11A$$

$$DI = \left(\frac{11}{231}\right) \times 100 = 4,76\%$$

→

O motor e rede de alimentação sem problemas!

31.1.8 Porta-escovas

Motores de rotor bobinado e alguns motores síncronos possuem porta escova, para tanto alguns cuidados e

procedimentos são necessários.

Os alojamentos do porta-escovas devem permitir a livre movimentação das escovas, porém folgas excessivas provocam trepidações e consequente faiscamento.
A pressão das molas deverá variar entre 200 e 250g/cm2, salvo casos especiais. A distância entre o porta-escovas e a superfície do comutador ou coletor deverá ser de 2 a 4 mm, no máximo, para evitar quebra das escovas e danos à sua superfície.
Nos motores de corrente contínua, a pressão deve ser entre 150 e 200g/cm^2. O conjunto dos porta-escovas é ajustado na fábrica na posição mais favorável para a comutação. Esta posição (zona neutra) é indicada por marcas de referência do suporte dos porta-escovas.
Uma vez estando ajustado o conjunto porta-escovas, não deverá ser mudado de posição, pois serve para qualquer valor de carga. Em caso de necessidade de desmontagem do conjunto, respeitar a marcação para montagem
Nos motores de indução com rotor bobinado, ao montar o sistema de escovas e porta-escovas deve-se ter cuidado especial nas distâncias entre as placas sobre as quais estão montados os porta-escovas e que fazem o curto-circuito das escovas da mesma fase para evitar curto-circuito entre fases no rotor

31.2 MANUTENÇÃO MECÂNICA

31.2.1 Mancais

Os mancais podem ser divididos em dois tipos básicos: mancais de rolamento e mancais de deslizamento. A escolha de um tipo de mancal ou de outro é realizada em função das condições de trabalho, como por exemplo, carga, rotação, temperatura, método de lubrificação, dimensões, etc.

31.2.2 Mancais de rolamento

Os mancais de rolamento, chamados também simplesmente de rolamento, são mancais onde a carga é transferida através dos elementos rolantes, que apresentam movimento de rotação. Neste tipo de aplicação o atrito na partida é superior ao presente durante a operação (chamado atrito de rolamento), mas ainda assim é desprezível quando comparado ao atrito verificado em mancais de deslizamento.

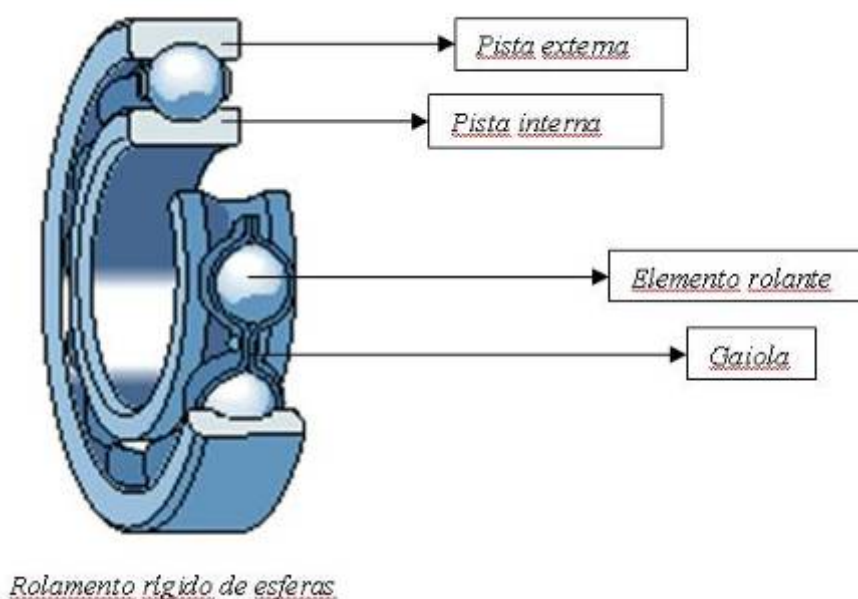
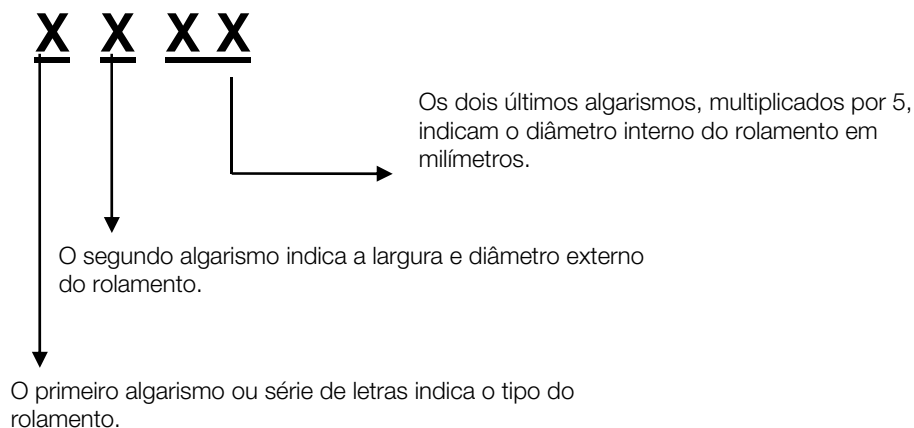
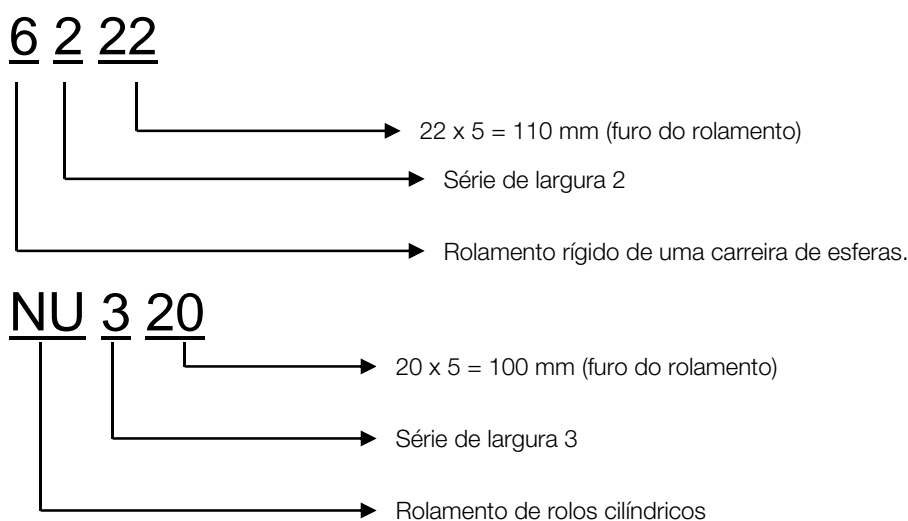



Figura 31.4: Rolamento rígido de esfera

Figura 31.5: Exemplos de rolamentos: rolamento de rolos cilíndricos, de contato angular e autocompensador de rolos

31.2.3 Nomenclatura

Exemplo:

31.2.4 Folgas internas

- As folgas indicadas no rolamento são medidas radialmente (folga entre os elementos rolantes e as pistas);
- São indicadas após a numeração do rolamento (sufixo);
- Em ordem crescente: C1 - C2 - NORMAL - C3 - C4 - C5;

Exemplo:

6322 – C3: rolamento de esferas, série de largura 3, furo de 110 mm, folga radial C3 (maior que a normal).

31.2.5 Armazenagem

Orientações para armazenamento de rolamentos:

- Manter na embalagem original.
- Ambiente limpo, seco, deve ser isento de vibrações e goteiras.
- Temperatura de 10ºC a 30ºC.
- Unidade do ar 60%.
- Não estocar sobre estrados de madeira verde, encostado em parede ou sobre chão de pedra.
- Devem estar afastados de canalizações de água ou aquecimento.
- Não armazenar próximo a ambientes contendo produtos químicos.
- Empilhamento máximo de cinco caixas.
- Rolamentos pré-lubrificados (sufixo Z) não devem ser estocados mais de dois anos (os sufixos 2Z e 2RS três anos).
- Rotatividade em estoque.
- Quando o rolamento estiver instalado no motor, girar mensalmente o eixo para renovar a lubrificação das pistas e esferas.

ATENÇÃO

Quando o rolamento estiver instalado no motor em estoque, girar mensalmente o eixo para renovar a lubrificação das pistas e esferas.

31.3 MANUTENÇÃO DOS ROLAMENTOS

31.3.1 Cuidados com a troca dos rolamentos

O manuseio de rolamentos durante a montagem e desmontagem deve ser realizado cuidadosamente. No caso de montagens a quente, o montador deve utilizar os EPI's adequados.
Durante a troca de um rolamento, não modifique nada que possa influenciar as condições de funcionamento. Lembrem-se, rolamentos são calculados para operar sob condições específicas de trabalho. Muitas vezes, mudanças que implicam na troca do lubrificante, aumento da velocidade, maiores cargas radiais e axiais são feitas sem que se faça uma previsão de possíveis efeitos negativos.
Os rolamentos, por serem componentes mecânicos de alta precisão, requerem cuidados proporcionais para serem manipulados, pois por mais que se utilizem rolamentos de alta qualidade, o desempenho esperado não poderá ser obtido se não forem manipulados adequadamente.
A sujeira, mesmo invisível a olho nu, apresenta efeito nocivo sobre os rolamentos, portanto, é fundamental evitar a entrada de sujeira mantendo o mais limpo possível os rolamentos e a área circundante.
O transporte e manuseio inadequado dos rolamentos provocam escoriações e esmagamentos, que resultam em causa das falhas; em casos extremos podem lascar e trincar. Consequentemente, faz-se necessário tomar o máximo de cuidado quando do manuseio.
Use sempre ferramentas apropriadas para a manipulação de rolamentos, deve-se evitar a improvisação de ferramentas e dispositivos.
Ao manusear os rolamentos é necessário o cuidado em manter as mãos limpas e secas, pois, a própria transpiração nas mãos se torna a causa da oxidação; se possível usar luvas.

31.3.2 Recomendações gerais para desmontagem

Existem várias maneiras de proceder com a desmontagem de rolamentos. No caso dos motores WEG, os assentos de rolamento são do tipo cilíndrico e para este arranjo, pode-se proceder com a desmontagem através dos métodos mecânico, hidráulico, por injeção de óleo ou aquecimento. A escolha do método de desmontagem pode depender do tamanho do rolamento e dos equipamentos disponíveis. Para os rolamentos utilizados nos motores WEG, o uso de ferramentas mecânicas e hidráulicas é suficiente. Em rolamentos maiores pode ser necessário o uso de aquecimento. É importante registrar o modelo do rolamento antes da desmontagem.

31.3.3 Ferramentas mecânicas

Os rolamentos podem ser desmontados utilizando-se um extrator mecânico ou hidráulico, sendo que as garras deverão se apoiar somente no anel interno, pois o rolamento é montado com interferência no eixo. Caso seja aplicado esforço no anel externo, o rolamento não deverá ser reutilizado sob qualquer hipótese.
Para evitar danos ao assento de rolamento, o extrator deverá estar posicionado corretamente. O uso de extratores auto-centrantes evitam danos e tornam a desmontagem mais rápida e segura.

Sacadores de rolamentos

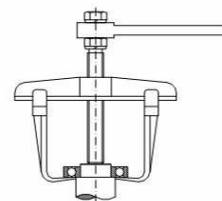
Figura 31.6: Exemplos de sacadores de rolamentos: sacador manual e sacador automatizado hidráulico

Durante a desmontagem do rolamento, o esforço deve ser aplicado somente sobre o anel interno.

Figura 31.7: Exemplo da correta utilização do sacador de rolamento

A desmontagem a quente pode utilizada na remoção de anéis internos de rolamentos de rolos cilíndricos.
Os fabricantes de rolamentos desenvolveram um sistema prático e rápido para este procedimento. Trata-se de um anel de alumínio que pode ser fornecido para todos os tamanhos de rolamentos de rolos (NU, NJ e NUP). A desmontagem é simples: primeiro retire o anel externo com rolos e gaiola; depois passe um óleo resistente à corrosão e bastante viscoso na pista do anel interno. Aqueça o anel de alumínio até aproximadamente 280°C e coloque-o ao redor do anel interno; comprima-o com as alças da ferramenta. Quando o anel interno estiver dilatado, desmonte-o junto com o aquecedor e separe-os imediatamente um do outro. Também se pode usar um aquecedor por indução, quando não se dispõe destes anéis e as desmontagens são frequentes.

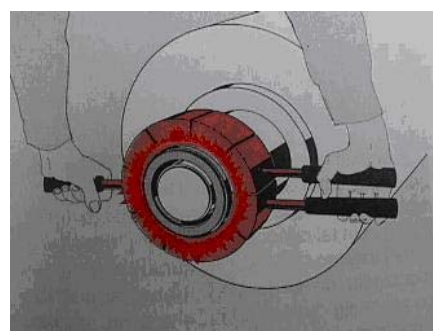



Figura 31.8: Anel de alumínio para desmontar o anel interno de rolamentos de rolos cilíndricos

Caso seja aplicado calor sobre o rolamento com a utilização de fogo, maçarico ou outra fonte de calor semelhante, o rolamento deve ser descartado e sua reutilização não deve ser considerada sob qualquer hipótese.

Algumas dicas para a desmontagem dos rolamentos:

- Sempre substitua as vedações de borracha e selos.

- Assegure-se de que o eixo esteja bem firme, do contrário pode haver danos ao rolamento e ao eixo;

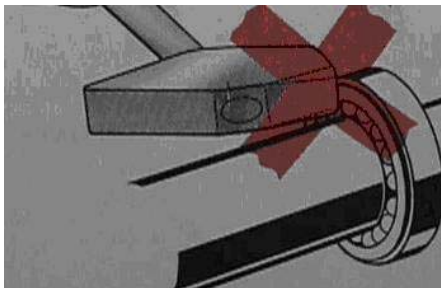



Figura 31.9: Exemplo de técnica que não deve ser utilizada

ATENÇÃO

Jamais aplique golpes de martelo diretamente sobre o rolamento.

31.3.4 Recomendações gerais para montagem

É necessário usar o método correto na montagem e observar as regras de limpeza para que o rolamento funcione satisfatoriamente. A montagem deve ser feita em local limpo e seco.
A montagem pode ser feita de 4 maneiras: mecânica, hidráulica, por injeção de óleo e aquecimento. Os fabricantes de rolamentos fornecem a maioria das ferramentas para a montagem. Para motores de grande porte, o método recomendado é a montagem a quente.
Recomenda-se que as marcações dos rolamentos estejam sempre voltadas para a ponta de eixo (lado de fora do motor) com o objetivo de facilitar sua visualização no ato da desmontagem**.**

31.3.5 Montagem a frio

A montagem de rolamentos com furo de até 60 mm pode ser feita com prensa hidráulica ou mecânica. Uma bucha deve ser usada entre a prensa e anel interno do rolamento.

31.3.6 Montagem a quente

Rolamentos grandes são difíceis de serem montados a frio em função da elevada interferência com o eixo, portanto o rolamento ou apenas o anel interno (no caso de rolamentos com anéis separáveis) pode ser aquecido para facilitar a montagem.
A diferença de temperatura entre o rolamento e o assento do eixo varia em função do ajuste. Normalmente 50 a 90°C acima da temperatura do eixo é suficiente para a montagem.

ATENÇÃO

Nunca aqueça o rolamento acima de 125ºC.
Utilize um termômetro p/ verificar a temperatura do rolamento.

31.3.7 Banho de óleo

Atualmente este método é pouco usual, mas pode ser utilizado em trabalhos de campo, onde não há aquecedor indutivo disponível.
Deve-se utilizar óleo compatível com o lubrificante que será aplicado ao rolamento. O óleo deve ser aquecido uniformemente. Para isso, o óleo deve ser movimentado para garantir a temperatura uniforme em todo o recipiente.

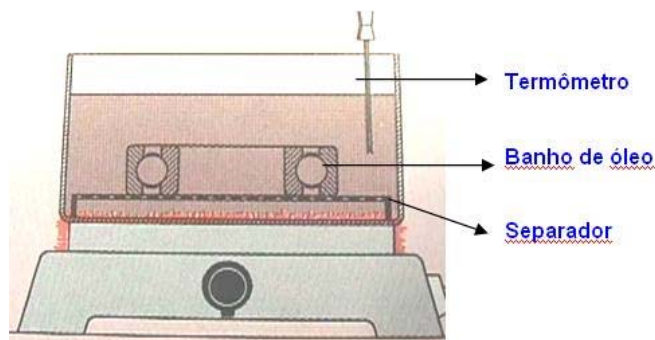



Figura 31.10: Exemplo de técnicas para manuseio de rolamento: Banho de óleo

O rolamento jamais deve ser apoiado diretamente sobre o fundo do recipiente, onde ocorrerá um maior aquecimento por condução.
Banho de óleo garante um aquecimento homogêneo, além de ser fácil avaliar a temperatura do banho. Nunca deixe o rolamento em contato direto com a superfície aquecida em banho de óleo.

31.3.8 Aquecedor indutivo

Os aquecedores por indução podem ser usados na montagem de rolamentos com interferência no eixo. Neste caso a montagem é mais rápida e simples.
Medir a temperatura no anel interno do rolamento: não ultrapassar 125°C.
Utilizar desmagnetizador para impedir circulação de corrente elétrica pelo rolamento

Figura 31.11: Exemplo de técnica: aquecedor indutivo

ATENÇÃO

Jamais aplique chama diretamente sobre o rolamento.

Figura 31.12: Exemplo de técnica que não deve ser utilizada

31.3.10 Desmontagem / montagem dos rolamentos – motores verticais

1- Anel de fixação interno
2- Anel de fixação externo
3- Centrifugador de graxa
4- Anel separador
5- Tampa da graxa
6- Disco de fechamento exteno
7- Proteção da mola
8- Tampa traseira
9- Mola de pré -carga
10- Anel interno
11- Parafuso de fixação
12- Parafuso de fixação
13- Parafuso de fixação
14- Rolamento externo
15- Rolamento interno
16- Porca de fixação
17- Mola retirada graxa
18- Alivio de graxa
19- Arruela de pressão

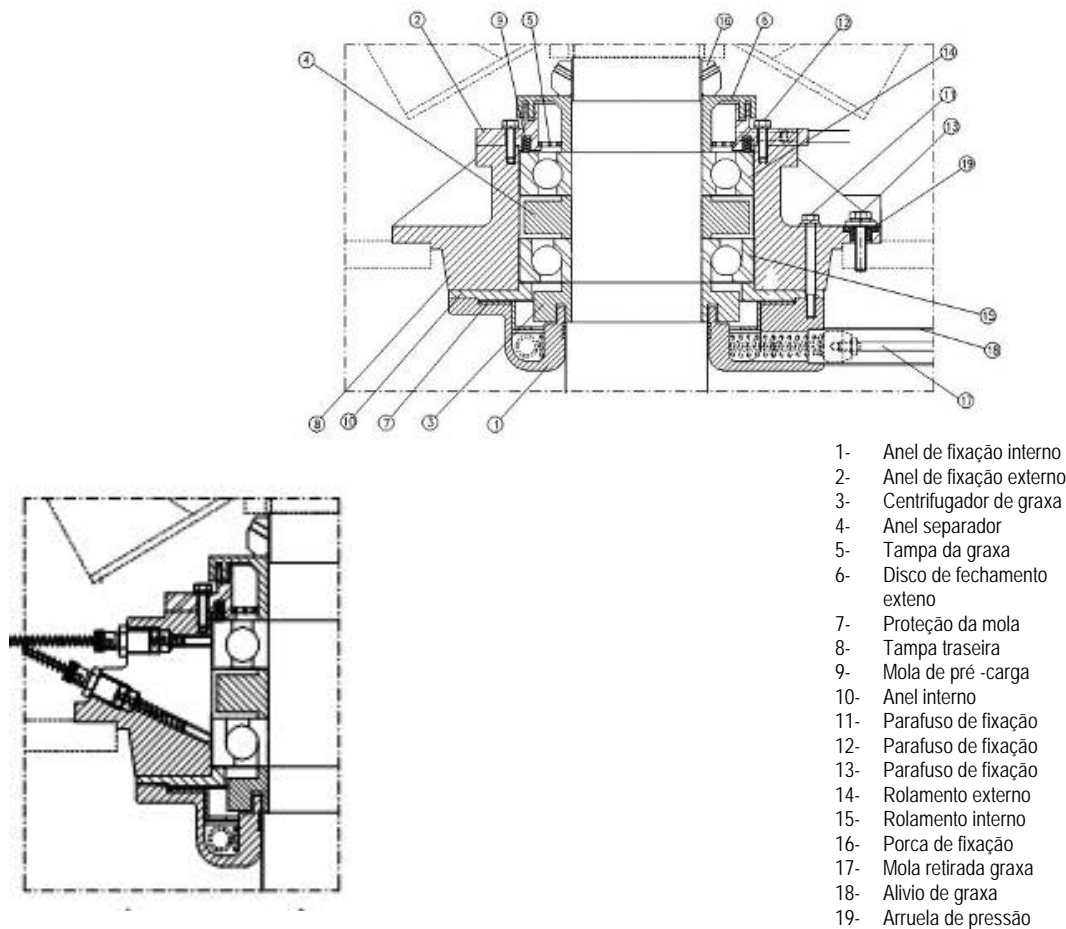



Figura 31.13: Detalhe do rolamento aplicação em motores verticais

Antes de desmontar:

- Retire os tubos de prolongamento da entrada e saída de graxa;
- Retire a tampa defletora (se houver) ventilador e outros componentes que estão na arte traseira do motor de tal forma que a ponta de eixo traseira fique livre para a retirada do rolamento.
- Limpe completamente a parte externa do mancal.
- Retire os sensores de temperatura do mancal e providencie um suporte para o eixo para evitar danos.

31.3.10.1 Desmontagem do mancal traseiro

- Tenha cuidado especial para evitar danos nas esferas, rolos e superfícies do rolamento e eixo. Para desmontagem do mancal, siga cuidadosamente as instruções a seguir, mantendo todas as peças em local seguro:
- Retire a porca de fixação (16);
- Retire o dispositivo de mola (17);
- Retire o disco de fechamento externo (6);
- Retire os parafusos (12) que fixam o anel de fixação externo;
- Retire o anel de fixação externo (2);
- Retire os parafusos (11 e 13);
- Retire a tampa traseira (8);
- Retire o rolamento externo (14), anel separador (4) e rolamento interno (15);
- Retire o parafuso que fixa o centrifugador de graxa (3) e remova-o;
- Retire o anel de fixação interno (1), se necessário.

31.3.10.2 Montagem do mancal traseiro

Limpe os mancais completamente e inspecione as peças desmontadas e o interior dos anéis de fixação.
Certifique-se que as superfícies do rolamento, eixo e anéis de fixação estejam perfeitamente lisas e sem rebarbas.
Coloque a graxa recomendada em ¾ do depósito dos anéis de fixação interno e externo e lubrifique o rolamento com quantidade suficiente de graxa antes de montá-lo, preenchendo todos os espaços entre os elementos rolantes.
Antes de montar o rolamento no eixo, aqueça-o a uma temperatura entre 50ºC e 100ºC. Insira o rolamento no eixo, garantido que esteja tocando em seu encosto. Para montagem completa do mancal, siga as instruções para desmontagem na ordem inversa

31.3.11 Desmontagem/ Montagem do mancal dianteiro para motores verticais

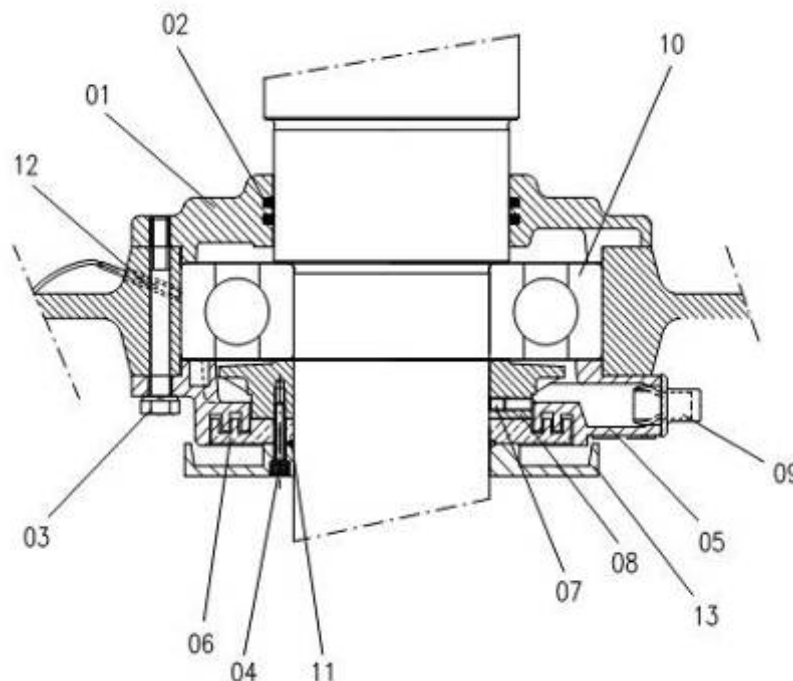



Figura 31.14: Desmontagem rolamento de motor vertical

Preencher o rolamento com graxa

Antes de desmontar

- Retire os tubos de prolongamento da entrada e saída de graxa;
- Limpe completamente a parte externa do mancal.
- Retire a escova de aterramento (se houver)
- Retire os sensores de temperatura do mancal e providencie um suporte para o eixo para evitar danos.

31.3.11.1 Desmontagem

- Tenha cuidado especial para evitar danos nas esferas, rolos e superfícies do rolamento e eixo. Para desmontagem do mancal, siga cuidadosamente as instruções a seguir, mantendo todas as peças em local seguro:
- Retire os parafusos (4) que fixam o disco de fechamento (13).
- Retire o anel com labirinto (6);
- Retire o parafuso (3) que fixam os anéis de fixação (1 e 5);
- Retire o anel de fixação externo (5);
- Retire o parafuso (7) que fixa o centrifugador de graxa (8);
- Retire o centrifugador de graxa (8);
- Retire a tampa dianteira;
- Retire o rolamento (10).
- Retire o anel de fixação interno (1), se necessário;

31.3.11.2 Montagem

Limpe os mancais completamente e inspecione as peças desmontadas e o interior dos anéis de fixação.
Certifique-se que as superfícies do rolamento, eixo e anéis de fixação estejam perfeitamente lisas e sem rebarbas.
Coloque a graxa recomendada em ¾ do depósito dos anéis de fixação interno e externo e lubrifique o rolamento com quantidade suficiente de graxa antes de montá-lo, preenchendo todos os espaços entre os elementos rolantes.

Preencher ¾ do depósito de graxa nos anéis de fixação

Figura 31.15: Técnicas de montagem rolamento

Antes de montar o rolamento no eixo, aqueça-o a uma temperatura entre 50ºC e 100ºC. Insira o rolamento no eixo, garantido que esteja tocando em seu encosto. Para montagem completa do mancal, siga as instruções para desmontagem na ordem inversa.

31.3.12 Motores lubrificados a óleo

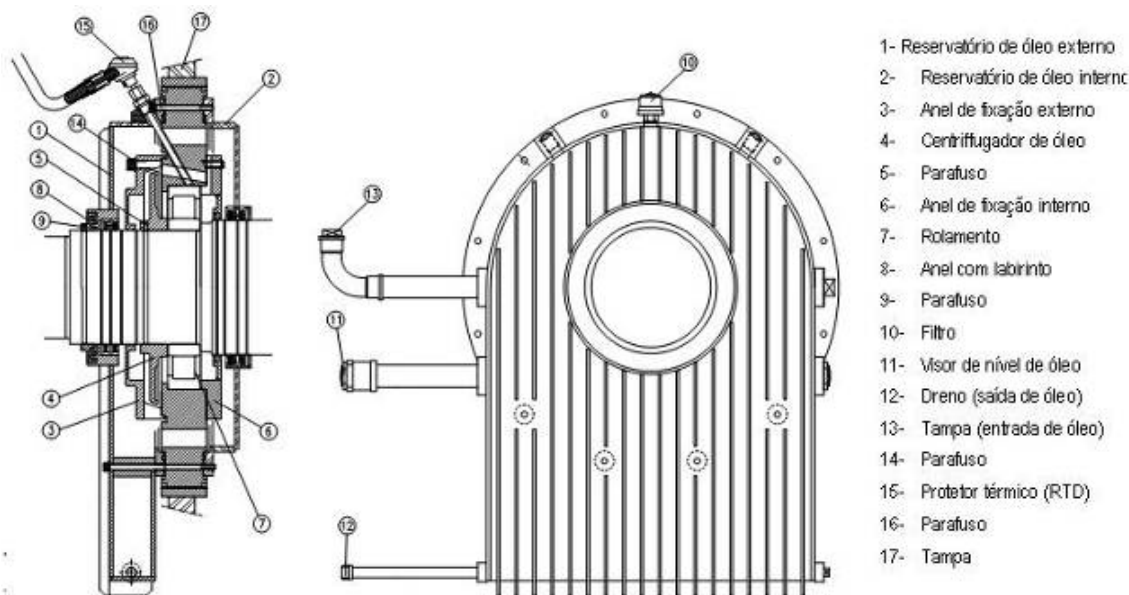



Figura 31.16: Detalhes mancal a rolamento lubrificado a óleo

31.3.12.1 Desmontagem/ Montagem do mancal lubrificado a óleo

Antes de desmontar

- Limpe externamente todo o mancal.
- Remova o dreno (12);
- Remova completamente o óleo do mancal;
- Remova o sensor de temperatura (15) do mancal;
- Remova a escova de aterramento (se houver);
- Providencie um suporte para o eixo para sustentar o rotor durante a desmontagem.

31.3.12.2 Desmontagem do mancal:

Tenha cuidado para evitar danos nas esferas, rolos ou na superfície do eixo. Para desmontar o mancal, siga com cuidado as informações abaixo. Mantenhas as peças desmontadas em local seguro e limpo.

- Retire o parafuso (9) que fixa o anel com selo labirinto (8);
- Retire o anel com selo labirinto (8);
- Retire os parafusos (16) que fixam o reservatório de óleo externo (1);
- Retire o reservatório externo de óleo (1);
- Retire os parafusos (14) que fixam o anel de fixação externo (3);
- Retire o anel de fixação externo (3).
- Retire os parafusos (5) que fixam o centrifugador de óleo (4) e remova-o.
- Retire a tampa dianteira (17);
- Retire o rolamento (7).
- Se for necessária a desmontagem completa do mancal, retire o anel de fixação interno (6) e o reservatório interno de óleo (2).

31.3.12.3 Montagem do mancal

Limpe completamente o rolamento, os reservatórios de óleo e inspecione todas as peças para montagem do mancal. Certifique-se que as superfícies de contato do rolamento, anéis estejam lisas, sem sinais de riscos ou corrosão.
Antes de montar o rolamento no eixo, aquecer o mesmo a uma temperatura entre 50 e 100ºC. Para montagem completa do mancal, siga as instruções de desmontagem na ordem inversa.

ATENÇÃO

Na montagem do mancal, aplique Curil T para vedar as superfícies do reservatório de óleo.

NOTA

Os motores podem ser fornecidos com filtro (10) no local indicado no desenho acima ou na entrada de óleo.

31.3.13 Relubrificação

Os objetivos da lubrificação dos rolamentos são:
- Reduzir o atrito e desgaste;
- Evitar contato metálico entre as partes dos rolamentos.
- Prolongar a vida do rolamento;
- Controlar a temperatura;
- Outros: vedação contra entrada de corpos estranhos, proteção contra a corrosão do mancal, etc.
- Os métodos de lubrificação se dividem em lubrificação a óleo e graxa, em função do tipo de lubrificante aplicado a cada mancal.

31.3.15 Lubrificação com graxa

A graxa é basicamente um fluido lubrificante (óleo) associado a um espessante (sabão) cujo objetivo é final é a lubrificação.

GRAXA = ÓLEO + ESPESSANTE + ADITIVOS

Mineral;	Lítio;
Sintético;	Complexo de lítio;
Vegetal;	Complexo de cálcio;
Silicone.	Sódio
	Uréia.

31.3.16 Características da lubrificação com graxa

31.3.16.1 Vantagens da Graxa

- Lubrificam e vedam;
- Reduzem o ruído;
- Não necessitam bombeamento ou circulação

31.3.16.2 Desvantagens da Graxa

- Não trocam calor;
- Não removem contaminantes;
- Menor poder de penetração;
- Não fluem.

Por que relubrificar os rolamentos?

Rolamentos engraxados devem ser relubrificados se a vida útil da graxa for menor que a vida útil esperada do rolamento. Assim, pode-se trabalhar com o rolamento até sua vida útil, apenas adicionando nova quantidade de graxa.

O que influencia na vida da graxa?

- Temperatura;
- Contaminantes;
- Carregamento;
- Arranjo/disposição do mancal
- Vedações deficientes.

O que acontece se o rolamento não for relubrificado adequadamente?

A relubrificação adequada é aquela em que a graxa correta é aplicada na quantidade especificada dentro do período previsto. Estes dados são peculiares a cada rolamento e constam na placa de identificação das máquinas.
Além disso, não deve haver contaminação e o lubrificante deve ser armazenado em condições não comprometam sua qualidade.
A relubrificação inadequada provoca consequentemente o comprometimento das propriedades lubrificantes da graxa levando o rolamento a falhar prematuramente.

31.3.17 Falhas na Lubrificação:

Excesso de Graxa ocasiona:

- Resistência ao Movimento;
- Aumento da Temperatura;
- Redução da vida útil do rolamento e do lubrificante;
- Aumento da temperatura do bobinado.

Falta de Graxa ocasiona:

- Rompimento da película lubrificante;
- Aumento do atrito e temperatura do rolamento;
- Início de descascamento nas pistas do rolamento;
- Travamento do rolamento por excesso de temperatura e falta de folga radial.

31.3.18 Quantidade de Graxa

Para lubrificação de rolamentos, pode-se usar a equação abaixo para avaliar a quantidade de graxa a aplicar:

$$G = \frac{DXB}{200} \left[\ g \ \right]$$

Onde:
D = diâmetro externo do rolamento [mm].
B = largura do rolamento [mm].

A quantidade correta de graxa para cada rolamento é informada na placa de identificação de cada máquina

Recomendações para relubrificação e manuseio da graxa:

- Evitar o preenchimento excessivo dos mancais;
- Em rolamentos novos, preencher os espaços vazios do rolamento com graxa;
- Preencher cerca de 3/4 dos anéis de fixação do rolamento com graxa;
- Em relubrificações, utilizar somente pistola engraxadeira manual;
- Manter os recipientes de graxa sempre fechados para evitar contaminação;
- Manter a superfície da graxa sempre nivelada;
- Manter a graxa afastada de fontes de ignição;
- Evitar contato contínuo com a pele. Limpar respingos que eventualmente aconteçam.

ATENÇÃO

Evite sempre a mistura de graxas.

31.4 RELUBRIFICAÇÃO DE ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Relubrificar não é simplesmente agregar graxa ao mancal do motor. Consiste em colocar a quantidade e lubrificante indicado, no intervalo previsto e no local certo. Para isso se recomenda a adoção de um procedimento de relubrificação baseado nas recomendações abaixo:

31.4.1 Motores com Graxeira:

- Limpar a ponta do pino engraxador;
- Se possível, injetar a quantidade de graxa recomendada na placa de identificação com o motor em operação;
- Caso o motor não possa ser relubrificado durante a operação, injetar metade da graxa indicada na placa de identificação com o motor parado;
- Arrancar o motor;
- Colocar o restante da graxa;
- Respeitar a quantidade de graxa e o tempo de lubrificação indicado na placa de identificação;
- Não misturar diferentes tipos de graxas;
- Utilizar somente engraxadeira manual para esta operação.

31.4.2 Graxa padrão da WEG

POLYREX EM103 – Graxa a base de Poliuréia, especialmente desenvolvida para mancais de máquinas elétricas girantes.

POLYREX EM103 é uma graxa que utiliza a Poliuréia como agente espessante e óleo básicos parafínicos altamente refinados como agente lubrificante. Complementados com aditivos específicos que lhe conferem excepcional capacidade de lubrificação em mancais de motores elétricos.

31.4.2.1 Aplicações

- Aplicado em todos os tipos de mancais que operem em altas temperaturas.
- Excepcional desempenho em descansos de motores elétricos.
- Faixa de aplicação: -30 a 170ºC.
- Mancais blindados.

31.4.2.2 Propriedades

- Graxas de múltiplo uso e de larga vida em operação.
- Contem aditivos como anti-corrosivos e anti-oxidantes.
- Elevadas propriedades de resistência a ação da água.
- Propriedades anti-desgaste.
- Excelente estabilidade mecânica.
- Proteção contra ferrugem.
- Color azul.
- Excelente desempenho em temperaturas elevadas.

31.4.2.3 Características típicas (*)

GRAU NLGI	3
Ponto de Gota, ºC - ASTM D 2265	270
Penetração trabalhada, 100.000 strokes, mm/10 ASTM D 217	40
Penetração trabalhada, 60x, mm/10, ASTM D 217	250
Cor Visual	Azul
Espessante	Poliuréia
Óleo Básico - Visc. Cin a 40ºC, cSt - ASTM D 445	115
Vida da graxa com alta temperatura, horas a 177ºC - ASTM D 3336	>750
Four Ball Wear Scar, 40 kg, 1200rpm, 75ºC, mm - ASTM D 2266	0,60
EMCOR – Performance corrosão, 10% água marina - ASTM D 6138	0,0 (sem corrosão)

(*) As características típicas aqui apresentadas representam uma média dos valores de produção, não se constituindo em especificações e podendo ser alteradas sem aviso prévio. Recomendamos que sempre fosse utilizado o lubrificante do tipo recomendado na placa do equipamento.

31.4.3 Temperatura de operação e limites

Medida do anel de fixação o mais próximo possível do mancal.

ALARME: 100ºC
PARADA: 120ºC

31.4.4 Armazenagem de graxas

Armazenagem externa deve ser evitada, pois a ação da atmosfera pode destruir as etiquetas das embalagens, ocasionando possíveis erros na seleção de graxas para aplicações específicas. Em muitos casos, a água escoa para dentro dos tambores e baldes lacrados, pela contração e expansão do produto ou do ar contido nas embalagens devido à variação da temperatura.
A tampa da embalagem da graxa deve ser recolocada depois da primeira abertura, pois o pó existente em suspensão no ar pode contaminar o produto.
Graxas não devem ser armazenadas junto a agentes oxidantes. Temperaturas extremas devem ser evitadas.

31.4.5 Manuseio, saúde e segurança

Não há perigo no uso de óleos e graxas lubrificantes, mantendo-os longe da pele e evitando-se respirar seus vapores e misturas. Entretanto, contatos repetidos e prolongados da pele com produtos derivados de petróleo podem resultar em irritação, dermatite e outros distúrbios de pele de menor incidência. Contatos desnecessários devem ser evitados.
Primeiros socorros: Se ingerido não induza o vômito. Lave os olhos com água em abundância. Lave a pele com água e sabão. Procure um médico imediatamente.
Líquido derramado: Espalhe material absorvente (areia ou serragem) sobre a área derramada. Incinere o material absorvente ou descarte conforme a legislação vigente.
Incêndio: Chame os bombeiros. Monóxido de carbono pode ser formado no caso de combustão incompleta. Use máscaras de oxigênio em locais fechados.

31.5 DEFEITOS NOS ROLAMENTOS

Os defeitos nos rolamentos podem ocorrer por várias razões: cargas mais altas do que as previstas, vedações ineficientes, ajustes inadequados etc. Cada um dos fatores provoca um tipo específico de falha. Consequentemente, através de análises dos rolamentos, é possível descobrir as causas e tomar as devidas ações corretivas.
De todos os rolamentos que falham, um terço "morre" de fadiga natural, um terço por falha de lubrificação e o restante por contaminação que penetra no rolamento e/ou manuseio inadequado (montagem inadequada).
As causas de falhas de rolamento variam muito em função dos diferentes segmentos industriais.

31.5.1 Como se inicia a falha do rolamento

O período até que o primeiro sinal de fadiga de material apareça no rolamento é função do número de revoluções, da magnitude da carga, da lubrificação e da limpeza. Fadiga é o resultado de tensões cíclicas que aparecem imediatamente abaixo da superfície carregada. Após algum tempo estas tensões provocam micro trincas que gradativamente evoluem até atingirem a superfície. O descascamento inicial é, normalmente, muito pequeno. No entanto, tensões maiores em combinação com os fragmentos carregados pelo lubrificante provocam a evolução da área de descascamento. Este processo ocorre em um período de tempo relativamente longo e percebe-se sua evolução pelo aumento do ruído e da vibração do rolamento. Neste caso, tem-se tempo suficiente para a troca do rolamento. Os vários estágios de descascamento podem ser vistos nas fotos abaixo.
Se o filme de óleo tiver uma espessura superior à rugosidade do material a probabilidade de ocorrerem tensões de superfícies é muito pequena. Se, no entanto, a carga é superior ao limite de fadiga, a fadiga normal do material ocorrerá mais cedo ou mais tarde.

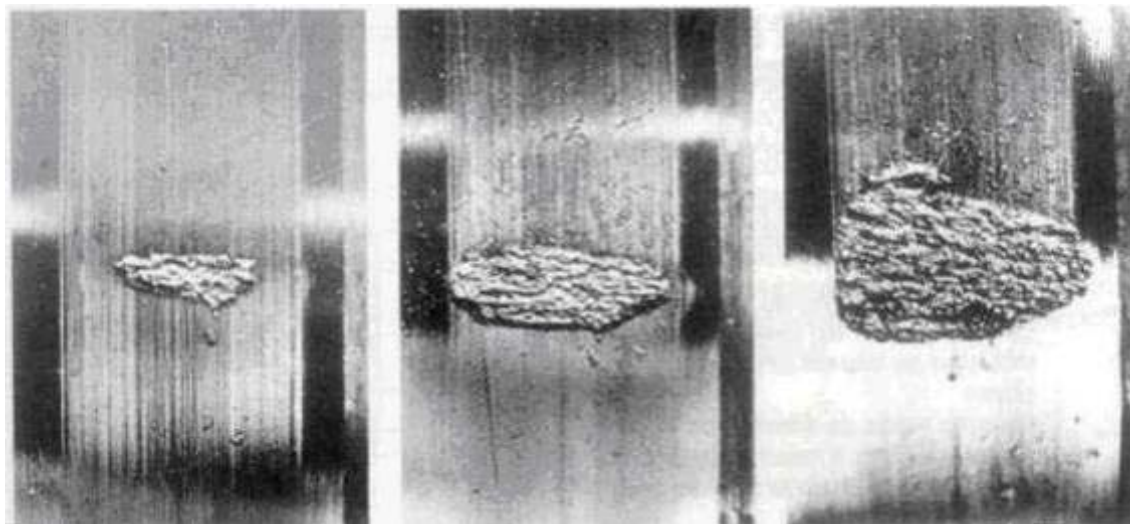



Figura 31.17: Defeitos em rolamento - descamamentos

Figura 31.18: Efeitos da corrosão por corrente elétrica nos roletes

Figura 31.19: Corrosão elétrica em toda a pista do anel interno

Figura 31.20: Marcas da corrosão elétrica em uma parte da circunferência da pista do anel externo

31.6 MANCAL DE DESLIZAMENTO

31.6.1 Montagem e desmontagem de mancais de deslizamento

Instruções Gerais

A manutenção de mancais de deslizamento inclui verificação periódica do nível e das condições do lubrificante, verificação dos níveis de ruído e de vibrações do mancal, acompanhamento da temperatura de trabalho e reaperto dos parafusos de fixação e montagem.
A carcaça deve ser mantida limpa, sem acúmulo de óleo ou poeira na sua parte externa para facilitar a troca de calor com o meio. Furos roscados para conexão de termômetro, visor de nível, entrada e saída de óleo, bomba de circulação de óleo ou termômetro para leitura no reservatório são fornecidos em ambos os lados, de modo que as conexões possam ser feitas pelo lado direito ou esquerdo da carcaça do mancal.
O dreno de óleo está localizado na parte inferior do mancal. No caso de mancais com lubrificação por circulação de óleo a tubulação de saída deve ser conectada à posição do visor de nível.
Se o mancal é eletricamente isolado as superfícies esféricas de assento do casquilho na carcaça são encapadas com um material isolante. Nunca retire esta capa. O pino anti-rotação também é isolado, e os selos de vedação são feitos de material não condutor. Instrumentos de controle de temperatura que estiverem em contato com o casquilho também devem ser devidamente isolados.
Mancais refrigerados a água são fornecidos com a serpentina de refrigeração instalada e devem ser manuseados com cuidado especial para não danificar as conexões durante o transporte e a instalação.

31.6.2 Desmontagem de mancal (tipo “EF”)

Para desmontar o mancal e ter acesso aos casquilhos, bem como a outros componentes siga cuidadosamente as instruções abaixo. Guarde todas as peças desmontadas em local seguro (ver figura).

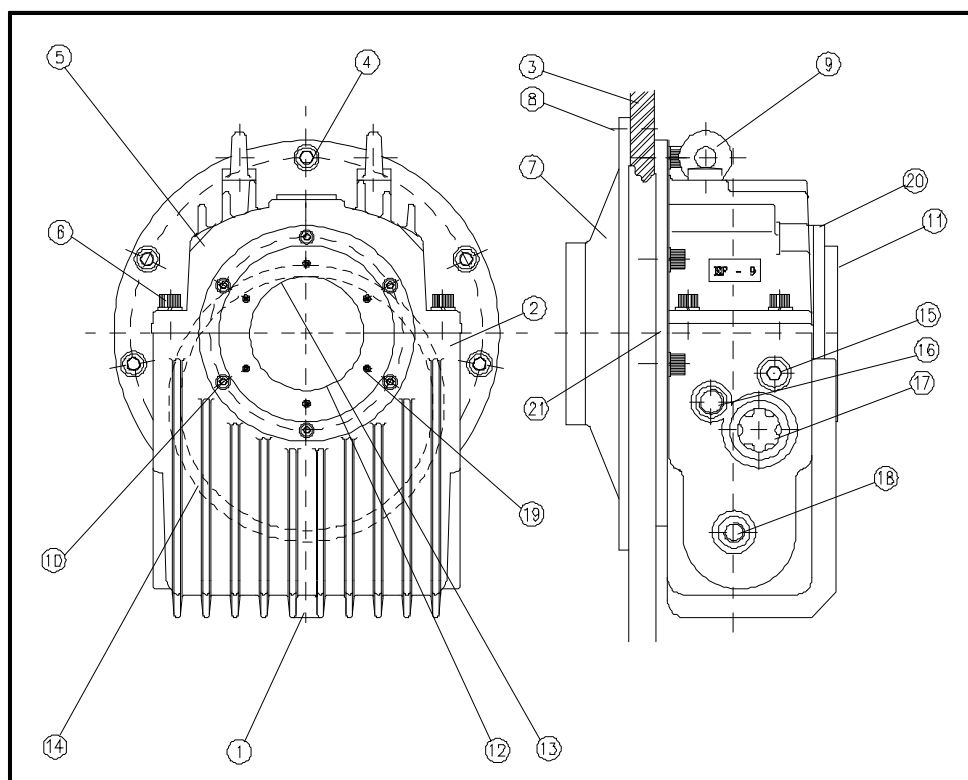



Figura 31.21: Detalhe mancal de deslizamento

Bujão de dreno;
1) Carcaça do mancal;
2) Carcaça do gerador;
3) Parafusos de fixação;
4) Capa da carcaça do mancal;
5) Parafusos da capa do mancal bipartido;
6) Selo máquina;
7) Parafusos de selo máquina;
8) Olhal de suspensão;
9) Parafusos da tampa externa;
10) Tampa externa;

31.6.2.1 Lado acionado

- Limpe completamente o exterior da carcaça. Desatarraxe e retire o plugue do dreno de óleo (1) localizado na parte inferior da carcaça permitindo que todo o lubrificante escoe.
- Remova os parafusos (4) que fixam a metade superior da carcaça (5) no motor (3).
- Retire os parafusos (6) que unem as faces bipartidas da carcaça (2 e 5).
- Use os parafusos olhais (9) para levantar a metade superior da carcaça (5) desencaixando-a completamente das metades inferiores da vedação externa (11), dos labirintos de vedação, dos alojamentos dos labirintos (20) e do casquilho (12).
- Continue a desmontar a metade superior da carcaça sobre uma bancada. Desatarraxe os parafusos (19) e retire a metade superior da proteção externa. Remova os parafusos (10) e desencaixe a metade superior do alojamento do labirinto (20).
- Desencaixe e retire a metade superior do casquilho (13).
- Remova os parafusos que unem as duas metades do anel pescador (14) e cuidadosamente separe-as e retire-as.
- Retire as molas circulares dos anéis labirinto e remova a metade superior de cada anel. Rotacione as metades inferiores dos anéis para fora de seus alojamentos e retire-as.
- Desconecte e remova o sensor de temperatura que penetra na metade inferior do casquilho.
- Usando uma talha ou macaco levante o eixo alguns milímetros para que a metade inferior do casquilho possa ser rotacionada para fora do seu assento.
- Importante: Para tanto é necessário que os parafusos 4 e 6 da outra metade do mancal estejam frouxos.
- Rotacione cuidadosamente a metade inferior do casquilho sobre o eixo e remova-a.
- Desatarraxe os parafusos (19) e retire a metade inferior da proteção externa (11). Desatarraxe os parafusos (10) e remova a metade inferior do alojamento do anel labirinto (21).
- Retire os parafusos (4) e remova a metade inferior da carcaça (2).
- Desatarraxe os parafusos (8) e remova o selo máquina (7).
- Limpe e inspecione completamente as peças removidas e o interior da carcaça.
- Para montar o mancal siga as instruções acima na ordem inversa.

NOTA

Torque de aperto dos parafusos de fixação do mancal ao motor = 10 Kgfm.

31.6.2.2 Lado não acionado

- Limpe completamente o exterior da carcaça. Solte e retire o plugue (1) do dreno de óleo localizado na parte inferior da carcaça, permitindo que todo o lubrificante escoe.
- Solte os parafusos (19) e retire a tampa do mancal (11).
- Desatarraxe os parafusos (4) que fixam a metade superior da carcaça (5) no motor (3). Retire os parafusos (6) que unem as faces bipartidas da carcaça do mancal (2 e 5).
- Use os parafusos olhais (9) para levantar a metade superior da carcaça (5) desencaixando-a completamente das metades inferiores da carcaça (2), do labirinto de vedação e do casquilho (12).
- Desencaixe e retire a metade superior do casquilho (13).
- Remova os parafusos que unem as duas metades do anel pescador (14) e cuidadosamente separe-as e retire-as.
- Retire a mola circular do anel labirinto e remova a metade superior do anel. Rotacione a metade inferior do anel labirinto para fora do seu alojamento e retire-a.
- Desconecte e remova o sensor de temperatura que penetra na metade inferior do casquilho.
- Usando uma talha ou macaco levante o eixo alguns milímetros para que a metade inferior do casquilho possa ser rotacionada para fora do seu assento.
- Rotacione cuidadosamente a metade inferior do casquilho (12) sobre o eixo e remova-a.
- Retire os parafusos (4) e remova a metade inferior da carcaça (2).
- Desatarraxe os parafusos (8) e remova o selo máquina (7).
- Limpe e inspecione completamente as peças removidas e o interior da carcaça.
- Para montar o mancal siga as instruções acima na ordem inversa.

NOTA

Torque de aperto dos parafusos de fixação do mancal ao motor = 10 Kgf.m.

31.6.3 Montagem do mancal

Verifique as superfícies de encaixe do flange certificando-se que elas estejam limpas, planas e isentas de rebarbas. Verifique se as medidas do eixo estão dentro das tolerâncias especificadas pelo fabricante do mancal e se a rugosidade está de acordo com o exigido (< 0,4).
Remova a metade superior da carcaça (2) e os casquilhos (12 e 13).
Verifique se não ocorreu nenhum dano durante o transporte e limpe completamente as superfícies de contato. Levante o eixo alguns milímetros e encaixe o flange da metade inferior do mancal no rebaixo usina do na tampa da máquina parafusando-o nesta posição. Aplique óleo no assento esférico da carcaça e no eixo. Coloque o casquilho inferior (12) sobre o eixo e rotacione-o para a sua posição cuidando para que as superfícies axiais de posicionamento não sejam danificadas. Após alinhar cuidadosamente as faces da metade inferior do casquilho e da carcaça abaixe vagarosamente o eixo até sua posição de trabalho. Com um martelo aplique leves golpes na carcaça para que o casquilho se posicione corretamente em relação ao seu assento e ao eixo. Este procedimento gera uma vibração de alta frequência que diminui o atrito estático entre o casquilho e a carcaça e facilita o seu correto alinhamento.
A capacidade de auto-alinhamento do mancal tem a função de compensar somente a deflexão normal do eixo durante a montagem. Na sequência deve-se instalar o anel pescador, o que deve ser feito com muito cuidado, pois o funcionamento perfeito do mancal depende da lubrificação fornecida pelo anel. Os parafusos devem ser levemente apertados e qualquer rebarba cuidadosamente retirada para proporcionar um funcionamento suave e uniforme do anel. Numa eventual

manutenção deve-se cuidar para que a geometria do anel não seja alterada.
As metades inferiores e superiores do casquilho possuem números de identificação ou marcações para orientar o seu posicionamento. Posicione a metade superior do casquilho alinhando suas marcações com as correspondentes na metade inferior. Montagens incorretas podem causar sérios danos aos casquilhos. Verifique se o anel pescador gira livremente sobre o eixo. Com a metade inferior do casquilho posicionada instale o selo de vedação do lado flangeado do mancal. (Veja parágrafo "Vedações"). Após revestir as faces bipartidas da carcaça com um componente de vedação Loctite 5920 COOPER, monte a parte superior da carcaça (5) cuidando para que os selos de vedação se ajustem perfeitamente em seus encaixes. Certifique-se também que o pino anti-rotação esteja encaixado sem nenhum contato com o furo correspondente no casquilho.

NOTA

Carcaça ou casquilho são intercambiáveis desde que considerados completos (metades individuais não são intercambiáveis).

Observações:

- Antes da montagem do selo, deve ser aplicado o selante CURIL T ao redor do mesmo.
- Aplicar silicone LOCTITE 5920 COOPER nas faces da carcaça do mancal.

Figura 31.22: Montagem do mancal de deslizamento

31.6.4 Estocagem do óleo

Estocagem externa deve ser evitada, se possível, tanto para tambores como a granel. A ação atmosférica pode destruir as etiquetas das embalagens, ocasionando possíveis erros na seleção de lubrificantes para aplicações específicas. Grande variação de temperatura pode acarretar vazamentos e desperdícios. A probabilidade de contaminação também aumenta. Em muitos casos, a água escoa para dentro de tambores lacrados quando succionada pela contração e expansão do produto no tambor.

Quando as embalagens forem estocadas externamente, as seguintes precauções devem ser tomadas:

- Deitar os tambores deixando os batoques paralelos ao chão, assegurando que estarão cobertos pelo produto, minimizando a contaminação por água e o ressecamento dos lacres.
- Se os tambores forem colocados em pé, posicione-os com pequena inclinação para prevenir a formação de poças de água na sua parte superior.
- Manter os batoques fechados.
- Antes de remover os batoques, secar e limpar a superfície do tambor, evitando a contaminação do lubrificante. A importância de manter pó e areia longe dos óleos usados em equipamentos caros não deve ser esquecida.

Tanques para estocagem a granel devem estar localizados internamente e ter ventilação. Embalagens galvanizadas nunca devem ser usadas para estocar ou transportar. A maioria dos óleos industriais contém aditivos que podem reagir com o zinco da galvanização formando sabão metálico, que pode obstruir passagens de óleo e filtros.
Lubrificantes não devem ser estocados junto a agentes oxidantes. Temperaturas extremas devem ser evitadas.

31.7 VIBRAÇÃO

Vibrações são efeitos provocados por forças dinâmicas que ocorrem ciclicamente que podem gerar desgastes e fadiga, provocando falhas prematuras em equipamentos e/ou em seus componentes. Cada situação que induz vibrações nas máquinas possuirá frequências características inerentes ao problema. Problemas distintos geram espectros de vibração com diferentes comportamentos e frequências. Assim, cada situação gera um espectro de vibração característico que pode auxiliar a diagnosticar qual o problema apresentado pela máquina.

A medição de vibração em máquinas elétricas girantes, poder ser utilizada para:

- Aprovação ou aceitação da máquina – realizado para verificar se os níveis de vibração encontram-se de acordo com os padrões pré-estabelecidos em normas.
- Proteção – realizado para atuar como alerta ou desligamento da máquina, dependendo dos níveis encontrados.
- Análise e diagnóstico – utilizado para identificar a causa de uma vibração excessiva na máquina, permitindo atuar em sua correção.
- Monitoramento – utilizado para acompanhar o comportamento da máquina durante sua vida, permitindo identificar o aparecimento de problemas e atuar na sua prevenção.

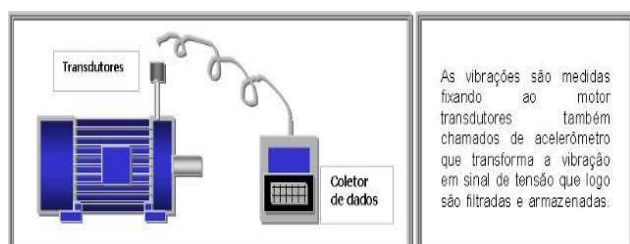
No caso da utilização para aprovação ou aceitação da máquina, as normas utilizadas para consulta são a IEC60034-14, NEMA MG1 – Parte 7 e NBR11390. Neste caso, as medições de vibração são realizadas nos mancais (dianteiro e traseiro) nas três direções (horizontal, vertical e axial).
Quando o cliente envia a meia luva de acoplamento para a WEG, o motor é balanceado com a meia luva montada no eixo. Caso contrário, é realizado de acordo com as normas citadas anteriormente, ou seja, balanceado com meia chaveta.

31.7.1 Análise espectral de vibrações

31.7.1.1 Equipamentos

Os equipamentos utilizados na medição de vibrações são compostos basicamente pelos seguintes componentes:

- Transdutor – é um sensor capaz de fornecer um sinal elétrico proporcional à vibração, possibilitando quantificar esta vibração. Existem diversos tipos de transdutores, sendo que os mais utilizados são os transdutores de velocidade (sem contato ou de proximidade), transdutores de velocidade e transdutores de aceleração.

A escolha do transdutor a utilizar depende da frequência que se procura avaliar. O deslocamento apresenta grandes amplitudes em baixas frequências e pequenas amplitudes em frequências de mais elevadas. O comportamento da aceleração é exatamente o contrário, ou seja, pequenas amplitudes nas baixas frequências, porém grandes amplitudes nas frequências mais elevadas.
A velocidade mantém um comportamento mais homogêneo tanto nas baixas quanto nas frequências mais elevadas e é o normalmente, o parâmetro mais utilizado para avaliar o limite de severidade de vibração (máximo valor admitido nos valores de medição). Quando se trata de problemas em altas frequências, como por exemplo, em rolamentos, a aceleração é o parâmetro mais utilizado, pois seus valores são mais facilmente medidos.

Um software complementar se encarrega de recolher as informações, melhorar, analisar e apresentar um relatório.

31.7.2 Interpretação dos resultados

A análise de vibração jamais deve ser realizada isoladamente, ou seja, deve-se sempre avaliar a condição da máquina em conjunto com outras avaliações complementares, como análise de ruído, inspeção visual, verificação dimensional, temperatura, além de procurar sempre relacionar a análise ao processo no qual a máquina trabalha.
Os problemas podem ser intrínsecos ao equipamento, como também podem ser causados por fontes externas, como pode ser exemplificado nas dicas abaixo:

- Má fixação do motor à base: parafusos de fixação mal apertados.
- Apoio inadequado do motor sobre a base: pés do motor mal apoiados ou partes dos pés do motor sem apoio na base.
- Base mal nivelada ou irregular: Para verificar isso, mantenha o medidor de vibração no ponto do motor onde foi registrado o maior valor de vibração na medição anterior; afrouxe ligeiramente um dos parafusos de fixação do motor na base e verifique se houve alguma alteração na vibração. Reaperte o parafuso e repita o teste com outro parafuso, e assim por diante. Caso verifique que houve uma redução da vibração devido ao afrouxamento de algum dos parafusos, é muito provável que a base esteja ruim. Nesse caso o cliente deverá checar a base e providenciar a correção da irregularidade. Após a base estar corrigida e o motor ter sido reinstalado, meça novamente a vibração em vazio.
- Vibração causada por outra(s) máquina(s) instalada(s) próxima(s) ao motor em análise: meça a vibração com o motor parado e registre no relatório.
- Excesso de chaveta: se o acoplamento (ou polia) do motor for mais curto que a chaveta, a sobra de chaveta pode gerar desbalanceamento e vibração, principalmente em motores de dois pólos.
- Acoplamento (ou polia) desbalanceado: retire o acoplamento (ou polia) e repita as medições. Registre no relatório e compare com os valores obtidos anteriormente. A medição da vibração deverá ser feita com o canal de chaveta preenchido com meia chaveta.
- Base defeituosa: realize uma inspeção visual na base metálica para verificar possível existência de trincas, rachaduras, amassamentos, ou qualquer outro defeito que possa prejudicar a rigidez da base. Inspecione também a base de concreto, principalmente nos pontos de fixação da base metálica (chumbadores).

31.7.3 Pontos de medição

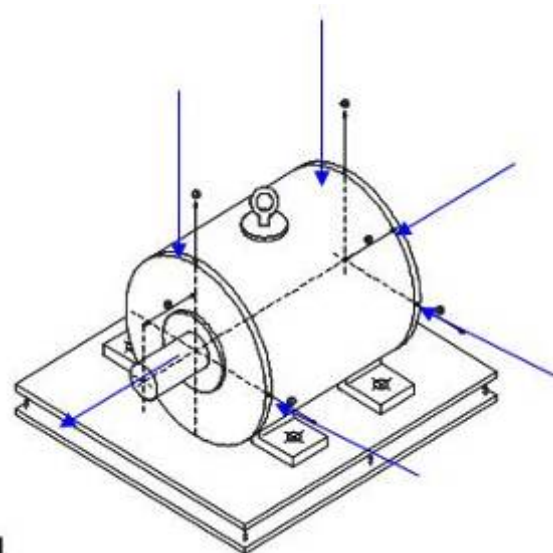



Figura 31.23: Pontos de medição de vibração

32 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO

32.1 A CONCEITOS – DEFINIÇÕES SEGUNDO ISO 8402:97

32.1.1 Disposição de uma não-conformidade

Ação a tomar com respeito a uma entidade que apresenta uma conformidade, com o objetivo de solucionar por sorte a não-conformidade.

32.1.2 Ações Corretivas

Ações tomadas para eliminar as causas de uma não-conformidade, de um defeito ou de qualquer outra situação indesejável, para evitar uma repetição.

32.1.3 Ações Preventivas

Ações tomadas para eliminar as causas de uma não-conformidade possível, de um defeito e de qualquer outra possível situação indesejável com o fim de prevenir uma ocorrência

32.2 PROGRAMAS DE MANUTENÇÃO

32.2.1Manutenção preditiva

Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviços desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva” – ABNT NBR 5462 – 1994.

32.2.2 Manutenção preventiva

Manutenção preventiva é todo o serviço de manutenção realizado em máquinas que não estejam em falha, estando com isto em condições operacionais, ou em estado de defeito” – FILHO, Gil Branco – Dicionário de Termos de Manutenção, confiabilidade e Qualidade. Abraman – Rio de Janeiro – RJ; 1996:p.66

32.2.3 Manutenção corretiva

Manutenção corretiva é todo o serviço de manutenção normalmente realizado depois que a falha ocorreu, normalmente ocasiona paralisação do processo, perda de produção, perda de qualidade e eleva os custos diretos de produção.

32.2.4 Manutenção de melhoria

É a intervenção que visa implementar um melhoramento contínuo dos equipamentos e serviços, com intuito de reduzir índice de indisponibilidade, aumento da performance, aumento do ciclo de vida e segurança, através da aplicação de novos dispositivos, bem como a adoção de novas técnicas de trabalho” – Rui Francisco Martins MARÇAL – Gestão da manutenção, Ponta Grossa – PR - 2004

32.4 EXEMPLOS ESTATÍSTICOS DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO E ÍNDICE DE FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

32.4.1 Definições – “Curva de vasilha” de um equipamento

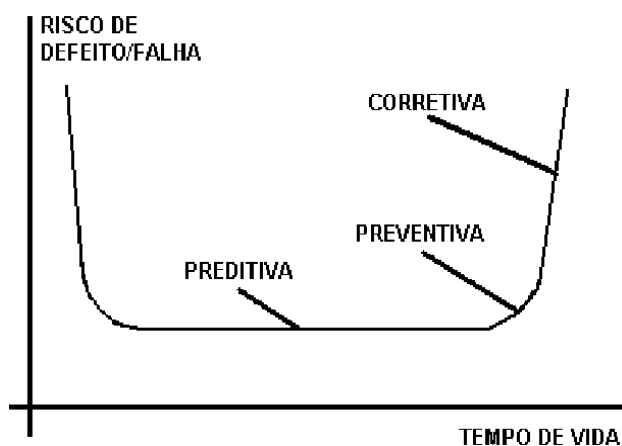



Figura 32.1: Curva da vasilha – tempo de vida x tipos de manutenção

32.5 DIVISÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS – FONTE IEEE

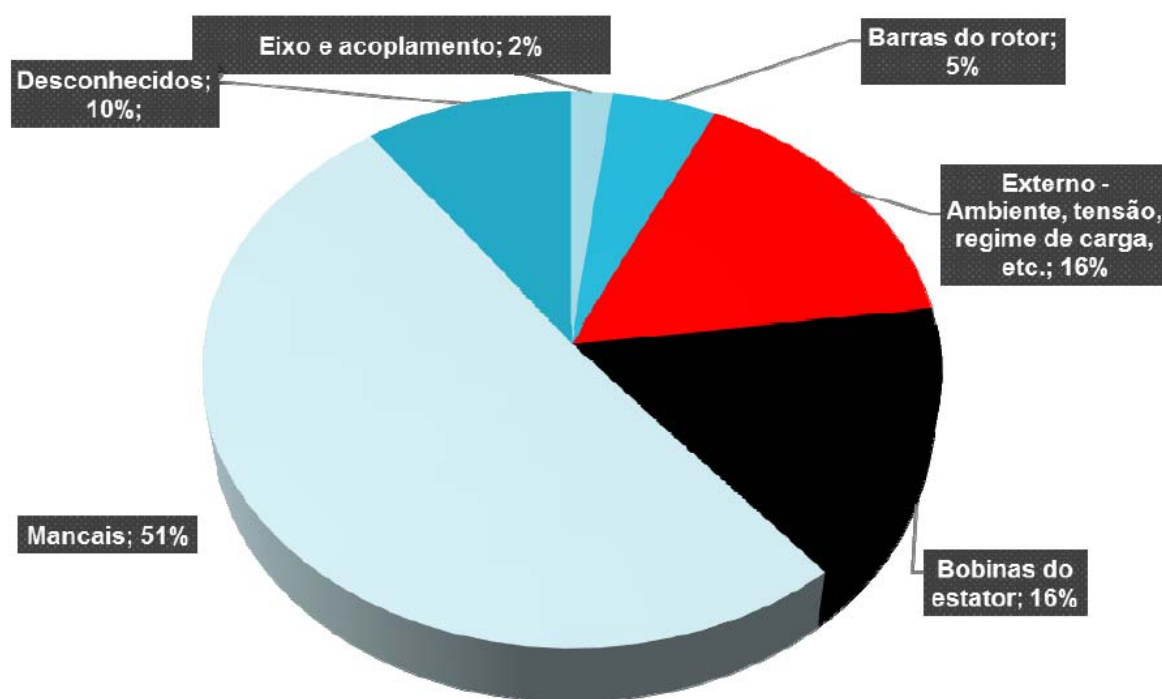



Figura 32.2: Divisão de falhas em máquinas elétricas rotativas

32.7 PLANO WEG DE MANUTENÇÃO PARA MOTORES ELÉTRICOS

Abaixo podemos verificar as orientações da WEG para correta manutenção de motores elétricos.

Tabela 32.1: Tabela orientativa para manutenções em motores WEG

	Semanal	Mensal	3 meses	6 meses	Anual	3 anos	5 anos	Nota
MOTOR COMPLETO								
Verificar ruído	X							
Verificar vibração	X							
Drenar a água condensada								Quando necessário
Reapertar os parafusos					X			
Desmontar o motor e checar as partes e componentes							X	
ENROLAMENTO DO ESTATOR E DO ROTOR								
Medir a resistência de isolamento					X			
Inspeção visual					X			
Verificação das amarrações e estecas						X		
MANCAIS								
Verificar ruído, vazamento de óleo e aquecimento	X							
Verificar pressão e vazão de óleo	X							
Limpeza e troca do óleo								Conforme os intervalos de lubrificação recomendados
Verificar os casquilhos							X	
Verificar a pista do eixo							X	
Verificar a qualidade do óleo			X					
Verificar a isolação do mancal					X			
RADIADORES								
Limpar a o interior dos radiadores					X			
Aplicar anticorrosivo					X			
Inverter o fluxo de água			X					
CAIXAS DE LIGAÇÃO E TERMINAIS DE ATERRAMENTO								
Limpar a o interior das caixas					X			
Reapertar as conexões elétricas					X			
ACOPLAMENTO								
Inspecionar o alinhamento					X			Inspecionar após a primeira semana de funcionamento
Inspecionar a fixação					X			Inspecionar após a primeira semana de funcionamento
DISPOSITIVOS DE MONITORAMENTO								
Inspecionar e registrar os valores	X							
Inspecionar o funcionamento					X			
RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO								
Verificar as conexões					X			

33 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE

33.1 INTRODUÇÃO

As instruções para armazenagem prolongada, descritas a seguir são válidas para máquinas elétricas com armazenamento prolongado e / ou períodos de parada prolongada anterior ao comissionamento.

33.2 GENERALIDADES

A tendência existente, especialmente durante a construção da planta, para armazenar máquinas elétricas por um período prolongado antes do comissionamento ou instalar imediatamente algumas unidades, resulta no fato que os estes equipamentos são expostos a influências que não podem ser avaliadas com antecedência para este período de tempo.
O stress (atmosférico, químico, térmico, mecânico) imposto a máquina elétrica, que pode acontecer durante manobras de armazenamento, montagem, testes iniciais e espera até o comissionamento de diferentes formas, é difícil avaliar.
Outro fator essencial é o transporte, por exemplo, o contratante geral pode transportar o equipamento ou unidade completa como transporte conjunto para local de instalação.
Os espaços vazios da máquina elétrica (parte interna, rolamentos e interior da caixa de ligação) são expostos ao ar atmosférico e flutuações de temperatura. Devido à umidade do ar, é possível a formação de condensação, e, dependendo de tipo e grau de contaminação de ar, substâncias agressivas podem penetrar nos espaços vazios.

Como consequência depois de períodos prolongados, os componentes internos como rolamentos, podem enferrujar, a resistência de isolamento pode diminuir a valores abaixo dos admissíveis e o poder lubrificante nos mancais é adversamente afetado.
Esta influência aumenta o risco de dano antes do comissionamento da planta.

Para manter a garantia do fabricante, deve ser assegurado que as medidas preventivas descritas nestas instruções, como: aspectos construtivos, conservação, embalagem, armazenamento inspeções e registros, sejam seguidos.

33.3 LOCAL DE ARMAZENAGEM

Para proporcionar as melhores condições de armazenagem durante longos períodos de armazenagem, o local de armazenagem deve obedecer rigorosamente aos critérios descritos nos itens a seguir.

33.4 ARMAZENAGEM INTERNA

- O ambiente deve ser fechado e coberto;
- O local deve estar protegido contra umidade, vapores, descarga de fumo agressivo, roedores e insetos.
- Não deve apresentar gases corrosivos, tais como: cloro, dióxido de enxofre ou ácidos;
- Não deve apresentar severas vibrações contínuas ou intermitentes.
- Possuir sistema de ventilação com filtro;
- Temperatura ambiente (5° C, > t < 60 °C), não devendo apresentar flutuação de temperatura súbita;
- Umidade relativa do ar <50%;
- Possuir prevenção contra sujeira e depósitos de pó;
- Possuir sistema de detecção de incêndio.
- Deve estar provido de eletricidade para alimentação das resistências de aquecimento e Iluminação.

Caso algum destes requisitos não seja atendido, a WEG sugere que proteções adicionais sejam incorporadas na embalagem durante o período de armazenagem, conforme segue:

- Caixa de madeira fechada ou similar com instalação que permita que as resistências de aquecimento sejam energizadas;
- Se existe risco de infestação e formação de fungo, a embalagem deve ser protegida no local de armazenamento borrifando ou pintando-a com agentes químicos apropriados.
- A preparação da embalagem deve ser feita com maior cuidado por uma pessoa experiente. A empresa contratada para esta finalidade deve ser responsável pela embalagem da máquina.

33.5 ARMAZENAGEM EXTERNA

A armazenagem externa (ao tempo) não é recomendada.
Caso a armazenagem externa não puder ser evitada, o equipamento deve estar acondicionado em embalagem específica para esta condição, conforme segue:
- Para armazenagem externa (ao tempo), além da embalagem recomendada para armazenagem interna, deve-se cobrir completamente esta embalagem com uma proteção contra poeira, umidade e outros materiais estranhos, utilizando uma lona ou plástico resistente.
- Posicione a embalagem, em engradados, feixes de madeira ou fundações que garantem a proteção contra a umidade da terra.
- Impeça a embalagem de se afundar na terra.
- Depois que a máquina estiver coberta, um abrigo deve erguido para proteger da chuva direta, neve e calor excessivo do sol.

IMPORTANTE

É recomendável conferir as condições do local de armazenagem e a condição dos equipamentos conforme plano de manutenção durante longos períodos de armazenagem, descrito neste manual.

33.6 PEÇAS SEPARADAS

Caso tenham sido fornecidas peças separadas (caixas de ligação, trocador de calor, tampas, etc...) estas peças deverão ser embaladas conforme descrição acima.
A umidade relativa do ar dentro da embalagem não deve exceder 50% até que a máquina seja desempacotada

33.7 RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO

As resistências de aquecimento do devem ser energizadas durante o período de armazenagem para evitar a condensação de umidade no interior da máquina, mantendo assim a resistência de isolamento dos enrolamentos em níveis aceitáveis.

A RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO DO DEVE SER OBRIGATÓRIAMENTE LIGADA QUANDO O MESMO ESTIVER ARMAZENADO EM LOCAL COM TEMPERATURA < 5 °C E UMIDADE RELATIVA DO AR > 50%.

33.8 RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

Durante o período de armazenagem, a resistência de isolamento dos enrolamentos da máquina deve ser medida e registrada a cada 3 meses.
Eventuais quedas no valor da resistência de isolamento devem ser investigadas.

33.9 SUPERFÍCIES USINADAS EXPOSTAS

Todas as superfícies expostas (por exemplo, à ponta de eixo e flanges) são protegidas na fábrica com um agente protetor temporário (inibidor de ferrugem).
Esta película protetora deve ser reaplicada pelo menos a cada 6 meses. Quando esta for removida e/ou danificada, deve-se fazer a mesma ação preventiva.

Produtos Recomendados:
Nome: Dasco Guard 400 TX AZ, Fabricante: D.A. Stuart Ltda
Nome: TARP, Fabricante: Castrol

34 MANCAIS

34.1 MANCAL DE ROLAMENTO LUBRIFICADO À GRAXA

Os rolamentos são lubrificados na fábrica para realização dos ensaios na máquina.
Durante o período de armazenagem, a cada dois meses deve-se retirar o dispositivo de trava do eixo e girar o eixo manualmente para conservar o mancal em boas condições.
Após 6 meses de armazenagem e antes da entrada em operação, os rolamentos devem ser relubrificados.
Caso a máquina permaneça armazenada por um período maior que 2 anos, os rolamentos deverão ser lavados, inspecionados e relubrificados.

34.2 MANCAL DE ROLAMENTO LUBRIFICADO À ÓLEO

Dependendo da posição, a máquina pode ser transportada com ou sem óleo no seu reservatório.
A máquina deve ser armazenada na sua posição original de funcionamento e com óleo nos mancais;
O nível do óleo deve ser respeitado, permanecendo na metade do visor de nível.
Durante o período de armazenagem, a cada dois meses deve-se retirar o dispositivo de trava do eixo e girar o eixo manualmente para conservar o mancal em boas condições.
Após 6 meses de armazenagem e antes da entrada em operação, os rolamentos devem ser relubrificados.
Caso a máquina permaneça armazenado por um período maior que 2 anos, os rolamentos deverão ser lavados, inspecionados e relubrificados.

34.3 MANCAL DE DESLIZAMENTO (BUCHA)

Dependendo da posição, a máquina pode ser transportada com ou sem óleo no seu reservatório e deve ser armazenado na sua posição original de funcionamento com óleo nos mancais;
O nível do óleo deve ser respeitado, permanecendo na metade do visor de nível.
Durante o período de armazenagem, a cada dois meses deve-se retirar o dispositivo de trava do eixo e gira-lo a uma rotação de 30 RPM para recircular o óleo e conservar o mancal em boas condições.

Caso não seja possível girar o eixo da máquina, o procedimento a seguir deve ser utilizado para proteger internamente o mancal e as superfícies de contato contra corrosão:
- Drene todo o óleo do mancal
- Desmonte o mancal.
- Limpe o mancal;
- Aplique o anti-corrosivo (ex.: TECTIL 511, Valvoline ou Dasco Guard 400TXAZ) nas metades superior e inferior do casquilho do mancal e na superfície de contato no eixo da máquina;
- Monte o mancal;
- Feche todos os furos roscados com plugs;
- Sele os interstícios entre o eixo e o selo do mancal no eixo através da aplicação de fita adesiva a prova d'água;
- Todos os flanges (ex.: entrada e saída de óleo) devem estar protegidas com tampas cegas;
- Retire o visor superior do mancal e aplique com spray o anti-corrosivo no interior do mancal;
- Coloque algumas bolsas de desumidificador (sílica gel) no interior do mancal. O desumidificador absorve a umidade e previne a formação de condensação de água dentro do mancal;
- Feche o mancal com o visor superior.

34.4 ESCOVAS

As escovas dos (se existirem) devem ser levantadas nos porta-escovas, pois não devem permanecer em contato com os anéis coletores durante o período de armazenagem, evitando assim a oxidação dos anéis coletores.
Antes da instalação e comissionamento da máquina, as escovas devem voltar à posição original.

34.6 CAIXA DE LIGAÇÃO

Quando a resistência de isolamento dos enrolamentos da máquina for verificada, deve-se inspecionar também a caixa de ligação principal e demais caixas de ligação, especialmente nos seguintes aspectos:
O interior deve estar seco, limpo e livre de qualquer depósito de poeira.
Os elementos de contato devem estar isentos de corrosão.
As vedações devem estar em condições apropriadas.
As entradas dos cabos devem estar corretamente seladas.

Se algum destes itens não estiver correto, uma limpeza ou reposição de peças deve ser realizada.

34.7 PREPARAÇÃO PARA ENTRADA EM OPERAÇÃO

Recomendamos que fossem seguidos os procedimentos descritos no capítulo “Entrada em Serviço” do Manual de Instalação e Manutenção, antes de colocar a máquina em operação.

35 PLANO DE MANUTENÇÃO DE ARMAZENAGEM

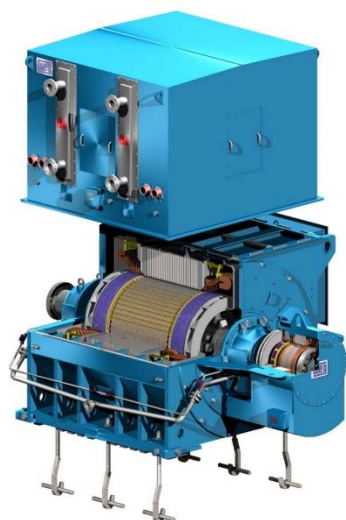
Durante o período de armazenagem, a manutenção da máquina deverá ser executada e registrada de acordo com o plano descrito na tabela abaixo:

	Mensal	A cada dois meses	A cada seis meses	A cada 2 anos	Antes de entrar em operação	Nota
Local de Armazenagem						
Inspecionar as condições de limpeza		X			X	
Inspecionar as condições de umidade e temperatura		X				
Verificar sinais de infestações de insetos		X				
Medir nível de vibração	X					
Embalagem						
Inspecionar danos físicos			X			
Inspecionar a umidade relativa no interior		X				
Trocar o desumidificador na embalagem (se houver)			X			Quando necessário
Resistência de aquecimento						
Verificar as condições de operação	X					
Máquina completa						
Realizar limpeza externa			X		X	
Verificar as condições da pintura			X			
Verificar o inibidor de oxidação nas partes expostas			X			
Repor o inibidor de oxidação			X			
Enrolamentos						
Medir resistência de isolamento		X			X	
Medir índice de polarização		X			X	
Caixa de ligação e terminais de aterramento						
Limpar o interior das caixas				X	X	
Inspecionar os selos e vedações						
Mancais de rolamento a graxa ou a óleo						
Rotacionar o eixo		X				
Relubrificar o mancal			X		X	
Desmontar e limpar o mancal				X		
Mancais de bucha						
Rotacionar o eixo		X				
Aplicar anti-corrosivo e desumidificador			X			
Limpar os mancais e relubrificá-los					X	
Desmontar e armazenar as peças				X		
Escovas (se existirem)						
Levantar as escovas						Durante a armazenagem
Abaixar as escovas e verificar contato com os anéis coletores					X	

36 ESCOPOS DE MANUTENÇÃO

36.1 MANUTENÇÃO PREDITIVA - INSPEÇÃO SENSITIVA

A manutenção Preditiva através da inspeção Sensitiva é um conceito novo dentro da manutenção preditiva, esta visa usar os sentidos humanos para avaliação dos equipamentos.

- Tato – mudança na frequência de vibração, umidade, temperatura, etc.
- Olfato – cheiro de fumaça, combustível, queima de isolamento, etc.
- Audição – mudanças de ruídos, chiados, roncos, batidas, etc.
- Visão – variação de cor, limpeza, distorção, tamanho, alinhamento, posição, etc.

COMPONENTES DE MÁQUINAS E STRESS					
Tipo de stress	**Mancais**	**Estator**	**Rotor**	**Eixo**	**Carcaça**
Térmico	X	X	X	X	X
Elétrico / isolamento	X	X	X		
Mecânico	X	X	X	X	X
Dinâmico	X	X	X	X	X
Eletromagnético	X	X	X	X	
Ambiente	X	X	X	X	X

36.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Ao longo dos anos a WEG ENERGIA desenvolveu uma série de inspeções preventivas em campo ou em fábrica, dentre os escopos que podemos citar se destacam, os seguintes:

36.2.1 Peritagem eletromecânica (CAMPO)

Serviços Mecânicos

Desconexão dos cabos de saída e acessórios, avaliação da caixa principal e de acessórios;
Abertura das tampas superiores e retirada do casquilho superior;
Avaliação visual do permutador (Trocador de calor) e suas tubulações, bem como seus acessórios;
Peritagem mecânica visual e dimensional nos mancais e labirintos, com medição e registro das folgas encontradas;
Verificar integridade do sistema de pressurização
Fechamento das caixas de mancais com aplicação de vedantes
Verificação do alinhamento
Conexão dos cabos e acessórios
Verificação geral da máquina, de todos acessórios, acoplamento, aterramento e condições da pintura
Inspeção visual nas cabeças de bobinas, amarrações e conexões, através das janelas de inspeção e por Boroscopia;
Comissionamento de partida, verificando as temperaturas e vibrações, caso a máquina esteja apta a rodar imediatamente após o serviço
Fornecimento de relatório técnico.

Serviços Elétricos

Medição de resistência de isolação
Determinação dos índices de absorção e polarização
Medição de resistência ôhmica dos enrolamentos
Medição das resistências ôhmicas dos sensores de temperaturas e resistências
Surge Test Comparativo a níveis de manutenção

36.2.2 Revisão parcial (campo)

Serviços Mecânicos

Desconexão dos cabos de saída e acessórios, avaliando a caixa principal e de acessórios
Desacoplagem do motor
Levantamento dos dados de alinhamento, motor com máquina acionada
Abertura das caixas e retirada dos mancais
Retirada das caixas de mancais
Retirada do permutador (Trocador de calor)
Retirada das tubulações de óleo dos mancais
Retirada e/ou afastamento das tampas principais e defletores de ar, que propiciem a inspeção e limpeza das cabeças de bobinas

Movimentação do motor na base caso necessário
Peritagem mecânica e visual dos permutadores quanto a vazamento e outros defeitos
Peritagem mecânica visual e dimensional nos mancais e labirintos
Limpeza parcial do rotor
Inspeção visual nas cabeças de bobinas, amarrações e conexões
Limpeza superficial dos enrolamentos estatóricos (cabeças de bobinas) com aplicação de solvente dielétrico
Tratamento térmico para secagem dos enrolamentos.
Correção da proteção anti-corona caso necessário.
Limpeza dos componentes do motor
Verificar integridade do sistema de pressurização
Montagem dos defletores de ar e tampas principais
Montagem das caixas de mancais
Montagem dos mancais, verificando o assentamento
Fechamento das caixas de mancais com aplicação de vedantes
Montagem da tubulação de óleo dos mancais
Montagem do permutador
Acoplamento entre motor e máquina acionada
Verificação do alinhamento e fechamento do acoplamento
Conexão dos cabos e acessórios
Verificação geral da máquina, de todos acessórios, acoplamento, aterramento e condições da pintura
Comissionamento de partida, verificando as temperaturas e vibrações desde que a máquina possa rodar imediatamente após o serviço.
Fornecimento de relatório técnico.

Serviços Elétricos

Testes elétricos preliminares - Resistencia de Isolação, IA e IP
Medição de resistência de isolação
Determinação dos índices de absorção e polarização
Medição de resistência ôhmica dos enrolamentos
Medição das resistências ôhmicas dos sensores de temperaturas e resistências
Surge Test Comparativo a níveis de manutenção

36.2.3 Revisão geral (campo)

Serviços Mecânicos

Desconexão dos cabos de saída e acessórios, com avaliação da caixa principal e acessórios
Desacoplagem do motor
Levantamento dos dados de alinhamento, motor com máquina acionada
Abertura das caixas e retirada dos mancais
Retirada das caixas de mancais
Retirada do permutador (Trocador de calor)
Retirada das tubulações de óleo dos mancais
Retirada das tampas principais e defletores de ar
Movimentação do motor na base
Montagem dos dispositivos de retirada do rotor
Retirada do rotor do estator ou afastamento máximo.
Peritagem mecânica e visual dos permutadores quanto a vazamento e outros defeitos
Peritagem mecânica visual e dimensional nos mancais e labirintos
Inspeção visual nas cabeças de bobinas, amarrações e conexões
Limpeza dos enrolamentos estatóricos com aplicação de solvente dielétrico
Inspeção, visual e mecânica no rotor e eixo
Limpeza do rotor com solvente dielétrico
Tratamento térmico para secagem dos enrolamentos
Mapeamento da fixação das estecas isolantes do estator
Pintura das cabeças de bobinas com tinta semi-condutiva da Von Roll para equalização dos potenciais e corrigir / evitar efeito corona / descargas parciais.
Limpeza de todos os componentes do motor
Verificar integridade do sistema de pressurização
Recolocar rotor no estator
Posicionamento do estator na base
Desmontagem dos dispositivos de retirada do rotor
Montagem dos defletores de ar e tampas principais
Montagem das caixas de mancais
Montagem dos mancais, verificando o assentamento
Fechamento das caixas de mancais com aplicação de vedantes
Montagem da tubulação de óleo dos mancais
Montagem do permutador
Acoplamento entre motor e máquina acionada
Verificação do alinhamento e fechamento do acoplamento
Medição do air gap entre o rotor e estator principal
Conexão dos cabos e acessórios
Verificação geral da máquina, de todos acessórios, acoplamento, aterramento e condições da pintura
Comissionamento de partida, verificando as temperaturas e vibrações desde que a máquina possa rodar imediatamente após o serviço.
Fornecimento de relatório técnico

Serviços Elétricos

Testes elétricos preliminares - Resistencia de Isolação, IA e IP
Medição de resistência de isolação
Determinação dos índices de absorção e polarização
Medição de resistência ôhmica dos enrolamentos
Medição das resistências ôhmicas dos sensores de temperaturas e resistências
Surge Test Comparativo a níveis de manutenção.

36.2.4 Rejuvenescimento - motor de indução (fábrica)

Desmontagem completa do equipamento e de todos os seus componentes;
Inspeção visual de todas as peças e componentes do equipamento;
Limpeza geral com jato de água quente, para remoção de pó, graxa e de pequenas partículas aderidas nos enrolamentos;
Secagem em estufa com temperatura controlada, para remoção total de umidade existente no mesmo;
Verificação Visual do estado de conservação do enrolamento;
Testes e ensaios elétricos no equipamento para detectar prováveis falhas;
Testes e ensaios mecânicos no equipamento para detectar prováveis falhas e desgastes das peças;
Impregnação completa da máquina com resina especial e posterior tratamento térmico em estufa, com temperatura controlada;
Pintura interna da carcaça para proteção contra corrosão;

Limpeza dos cabos de saída e cabos de sensores de temperatura eliminando resíduos de impregnação existente que possam se soltar durante o funcionamento da máquina;
Troca dos rolamentos;
Medição da resistência de isolamento com IA / IP e SURG TEST;
Medição da resistência ôhmica dos enrolamentos;
Balanceamento do rotor completo;
Ensaios elétricos com envio de relatório;
Acabamento e pintura conforme a cor original.

36.2.5 Rejuvenescimento - motor síncrono (fábrica)

Desmontagem completa do equipamento e de todos os seus componentes;
Inspeção visual de todas as peças e componentes do equipamento;
Limpeza geral com jato de água quente, para remoção de pó, graxa e de pequenas partículas aderidas nos enrolamentos;
Secagem em estufa com temperatura controlada, para remoção total de umidade existente no mesmo;
Verificação Visual do estado de conservação do enrolamento;
Testes e ensaios elétricos no equipamento para detectar prováveis falhas;
Testes e ensaios mecânicos no equipamento para detectar prováveis falhas e desgastes das peças;
Impregnação completa da máquina com resina especial e posterior tratamento térmico em estufa, com temperatura controlada;
Limpeza dos cabos de saída e cabos de sensores de temperatura eliminando resíduos de impregnação existente que possam se soltar durante o funcionamento da máquina;
Pintura interna da carcaça para proteção contra corrosão;
Usinagem do anéis coletores;
Revisão geral do porta escovas;
Troca das escovas;
Troca dos rolamentos;
Medição da resistência de isolamento com IA / IP e SURG TEST;
Medição da resistência ôhmica dos enrolamentos;
Balanceamento do rotor completo;
Ensaios elétricos com envio de relatório;
Acabamento e pintura conforme a cor original.

36.3 MANUTENÇÃO CORRETIVA

Este de manutenção visa corrigir alguma falha. Abaixo podemos citar alguns casos de manutenções corretivas.

36.3.1 Motor de indução

Repotênciação;
Rebobinamento do estator;
Troca dos anéis de curto do rotor;
Troca das barras do rotor;
Recuperação do trocador de calor;
Metalização
Rebabitagem
Embuchamento das tampas
Reembarralhamento do pacote de chapas do estator
Jateamento

36.3.2 Motor síncrono

Repotênciação;
Rebobinamento do estator;
Rebobinamento do rotor;
Rebobinamento do rotor da excitatriz;
Rebobinamento do estator da excitatriz;
Reisolamento completo dos polos do rotor;
Reisolamento dos polos do rotor para massa;
Instalação de excitatriz Brushless;
Troca dos anéis coletores;
Troca das estecas do estator;

36.4 DESVANTAGENS DA MANUTENÇÃO CORRETIVA

Desvantagens:

Paradas não programadas;
Perda na produção;
Falta ou excesso de pessoas;
Excesso de material em peças de reposição;
Riscos de acidentes (pessoas,materiais e/ou ambientais);
Não se analisam as causas;
Estado de estresse permanente.

37 ANEXOS

37.1 SISTEMA INTERNACIONAL

37.1.1 Generalidades

A preocupação mundial de se conseguir uma uniformização das unidades e métodos de medida vem de longa data, concretizando-se pelas regulamentações firmadas nas diversas e sucessivas reuniões da Convenção Internacional do Metro, e cuja 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas de 1960 estabeleceu as bases para o Sistema Internacional (SI). O Brasil como membro desta entidade internacional, publicou em 12 de setembro de 1968, o decreto-lei nº 63.233 relativo à matéria, aprovado o Quadro Geral de Unidades de Medida, definindo assim de modo preciso sua posição entre outros países que ainda relutam em compreender as vantagens desta uniformização.

Tabela 37.1: Sistema internacional de unidades

GRANDEZAS	UNIDADES
Aceleração	m/s^2
Aceleração angular	rad/s^2
Atividade	s^{-1}
Ângulo plano	rad
Ângulo sólido	sr
Área	m^2
Calor de massa	J/kgK
Capacitância	F
Condutância	S
Condutividade térmica	W/mK
Condutividade	S/m
Convergência	di
Densidade de fluxo de energia	W/m^2
Dose absorvida	J/kg
Eficiência luminosa	lm/W
Emitância luminosa	l/m^2
Energia	J
Entropia	J/K
Excitação luminosa	lxs
Exposição	C/kg
Fluxo (de massa)	kg/s
Fluxo luminoso	lm

GRANDEZAS	UNIDADES
Fluxo magnético	Wb
Frequência	Hz
Força	N
Gradiente de temperatura	K/m
Impulsão	Ns
Indução magnética	T
Indutância	H
Intensidade de campo elétrico	V/m
Intensidade de campo magnético	A/m
Intensidade luminosa	cd
Intensidade energética	W/sr
Intensidade de corrente	A
Intervalo de frequências	oitava
Comprimento	m
Luminância energética	W/srm^2
Luminância	cd/m^2
Iluminamento	lx
Massa	kg
Massa específica	Kg/m^3
Momento de força	Nm
Momento cinético	Kgm^2

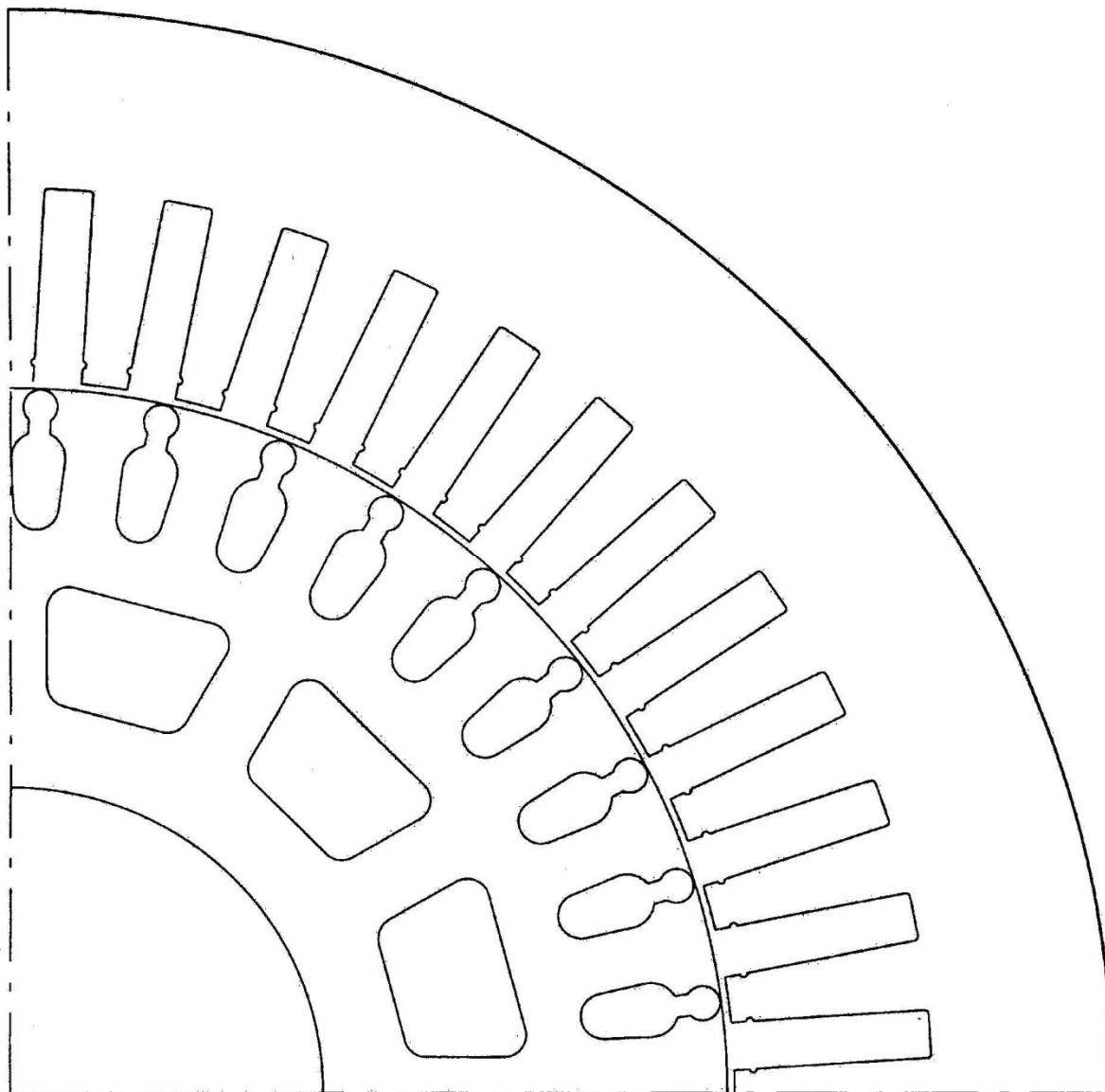
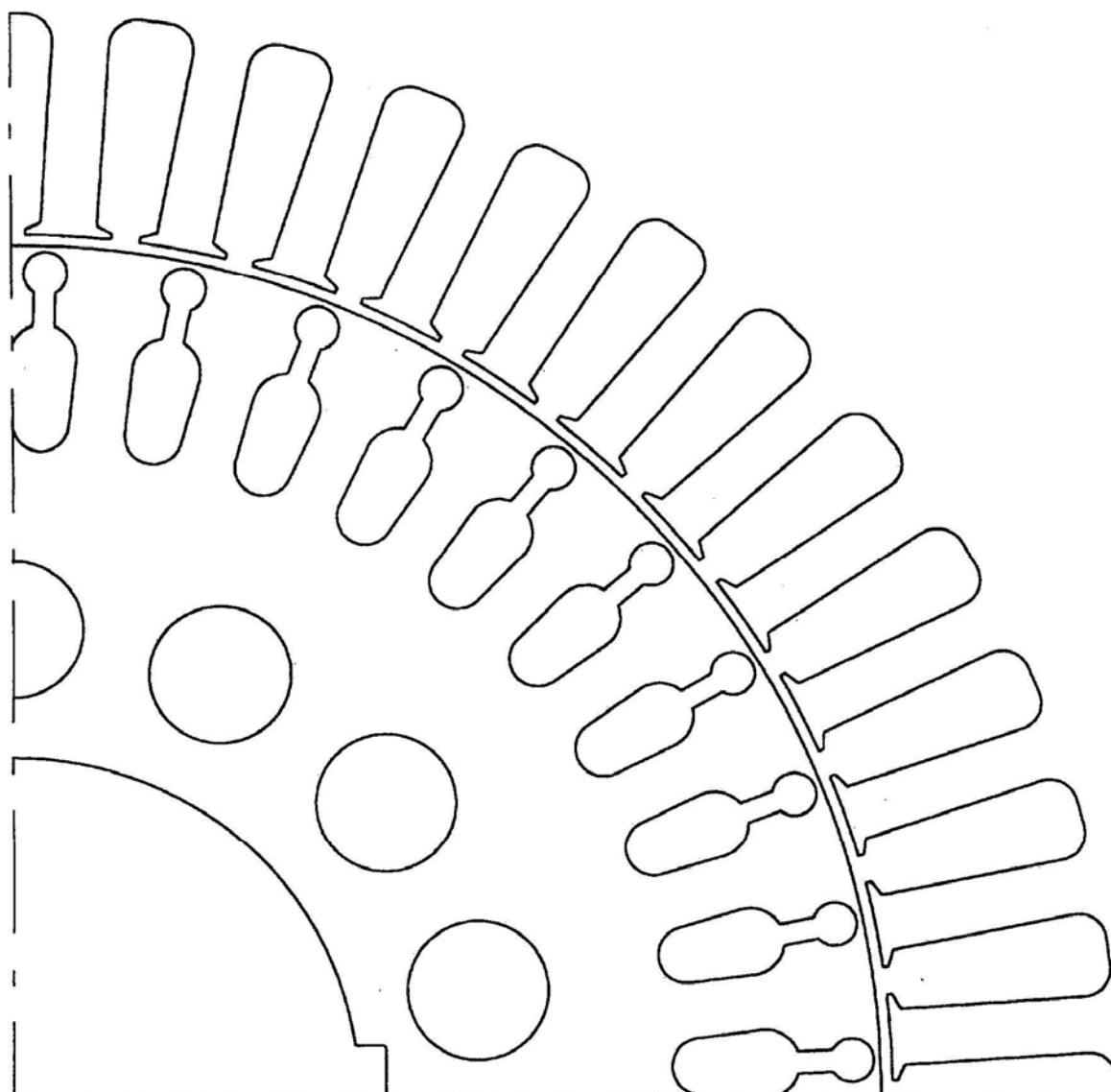
GRANDEZAS	UNIDADES
Momento de inércia	kgm^2
Nível de potência	B
Número de ondas	m^{-1}
Potência	W
Pressão	N/m^2
Quantidade de luz	lms
Quantidade de eletricidade	C
Relutância	A/Wb
Resistência elétrica	Ω
Resistividade	Ωm
Resistividade de massa	$\Omega kg/m^2$
Temperatura termodinâmica	K
Tensão elétrica	V
Tensão superficial	N/m
Tempo	s
Vazão	m^3/s
Velocidade	m/s
Velocidade angular	rad/s
Viscosidade cinemática	m^2/s
Viscosidade dinâmica	Ns/m^2
Volume	m^3

37.2 CONVERSÃO DE UNIDADES

Tabela 37.2: Conversão de unidades.

TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES			
Grandeza	Multiplique	Por	Para obter
Área	Metro quadrado (m^2) Polegada quadrada (sq.in) Pé quadrado (sq.ft)	1550 6,94x10^{-3} 0,0929	Polegada quadrada (sq.in) Pé quadrado (sq.ft) Metro quadrado (m^2)
Comprimento	Metro (m) Polegada (in) Pé (ft)	39,37 0,0833 0,3048	Polegada (in) Pé (ft) Metro (m)
Conjugado	Newton-metro (Nm) Quilograma-força metro (mkgf) Libra-força pé (lb.ft) Onça pé (oz.ft) Newton-metro (Nm) Quilograma-força metro (mkgf)	0,1019 7,235 16 0,0847 0,7376 115,7	Quilograma-força metro (mkgf) ou (mkp) Libra-força pé (lb.ft) Onça pé (oz.ft) Newton-metro (Nm) Libra-força pé (lb.ft) Onça pé (oz.ft)
Energia	Joule (J) ou Newton-metro (Nm) Quilograma-força metro (mkgf) Quilowatt-hora (kWh) Libra-força pé (lb.ft) Caloria (cal) Joule (J) ou Newton-metro (Nm) Quilograma-força metro (mkgf) Quilowatt-hora (kWh) Libra-força pé (lb.ft)	0,102 2,73x10^{-6} 2,66x10^{6} 0,3238 4,187 2,78x10^{-7} 7,235 8,6x10^{5} 1,356	Quilograma-força metro (mkgf) ou (mkp) Quilowatt-hora (kWh) Libra-força pé (lb.ft) Caloria (cal) Joule (J) ou Newton-metro (Nm) Quilowatt-hora (kWh) Libra-força pé (lb.ft) Caloria (cal) Joule (J) ou Newton-metro (Nm)
Inércia	Quilograma-metro quadrado (kgm^2) Libra-pé quadrado (sq.lb.ft) Libra-polegada quadrada (sq.lb.in)	23,73 144 2,93x10^{-4}	Libra-pé quadrado (sq.lb.ft) Libra-polegada quadrada (sq.lb.in) Quilograma-metro quadrado (kgm^2)
Força	Newton (N) Quilograma-força (kgf) ou (kp) Libra-força (lbf)	0,1019 2,205 4,45	Quilograma-força (kgf) ou quiloponde (kp) Libra-força (lbf) Newton-metro (Nm)
Potência	Quilowatt (kW) Cavalo vapor (cv) Quilograma-força metro por segundo	1,3587 75 9,81	Cavalo vapor (cv) Quilograma-força metro por segundo (kgfm/s) Watt (W)
Pressão	Newton por metro quadrado (N/m^2) Quilograma-força por centímet. quad. Libra-força por polegada quad. (psi) Atmosfera (atm) bar Metro de água (mH$_2$O) Newton por metro quadrado (N/m^2) Quilograma-força por centímet. quad.Libra-força por polegada quad. (psi) Metro de água (mH$_2$O) Newton por metro quadrado (N/m^2) Quilograma-força por centímet. quad. Metro de água (mH$_2$O)	1,02x10^{-5} 14,22 0,06807 1,0132 1,02 98101,45x10^{-4} 0,968 6,89x10^{-2} 1,42 9,87x10^{-6} 0,981 0,1	Quilograma-força por centímet. quad. Libra-força por polegada quadrada (psi) Atmosfera (atm) bar Metro de água (mH$_2$O) Newton por metro quadrado (N/m^2) Libra-força por polegada quadrada (psi) Atmosfera (atm) bar Libra-força por polegada quadrada (psi)Atmosfera (atm) bar Quilograma-força por centím. quad. (kgf/cm^2)

37.3 EXEMPLOS DE RANHURAS

37.3.1 Ranhura do Estator para Bobinas de Alta Tensão e Rotor com Ranhuras para Injeção de Alumínio

37.3.2 Ranhura do Estator para Bobinas de Baixa Tensão e Rotor com Ranhuras para Injeção de Alumínio

37.3.3 Ranhura do Estator para Bobinas de Alta Tensão e Rotor com Ranhuras para Inserção de Barras de Cobre